

## LE FLEUVE SÉNÉGAL : I. BILAN HYDROLOGIQUE ET FLUX CONTINENTAUX DE MATIÈRES PARTICULAIRES A L'EMBOUCHURE

Jean Yves GAC\* et Alioune KANE\*\*

**RÉSUMÉ** — Cette étude fournit, à l'échelle mensuelle et annuelle, l'ensemble des informations disponibles sur les écoulements du fleuve Sénégal de 1903 à 1983. Le bilan hydrologique est établi aux deux stations-clefs de Bakel (exutoire amont) et de Dagana (assimilée à l'embouchure du fleuve : les modules interannuels y sont respectivement de 715 et de 641 m<sup>3</sup>/s. Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle est présenté au niveau du réseau de surface et de subsurface. Les flux de matières particulaires à l'embouchure du fleuve ont été évalués au cours des cycles déficitaires 1981-1982 (module : 374 m<sup>3</sup>/s) et 1982-1983 (module : 254 m<sup>3</sup>/s) à 2 800 000 tonnes et 1 200 000 tonnes. Les turbidités moyennes ont été de 252 mg/l et de 196 mg/l. Les minéraux argileux (kaolinite et smectite) prédominent. L'expulsion continentale annuelle de matière organique est faible et ne représente que 1,7 % des transferts solides vers l'océan. En dernier lieu, de nouvelles hypothèses sont formulées pour mieux cerner les mécanismes d'acquisition de la charge solide par les fleuves sahéliens.

Fleuve Sénégal, Afrique, Bilan de l'eau, Transport solide, Composition chimique, Composition minéralogique

### Senegal river. Part I. Water budget and flux of carried load through the estuary

**ABSTRACT** — This study presents all the available data concerning the monthly and yearly discharge of the river Senegal between 1903 and 1983. The water budget is given for Bakel (upstream station) and Dagana (the last downstream point before the estuary where the river discharge is measured regularly). At these points the mean yearly runoff are respectively 715 and 641 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. The present exceptional drought is discussed through its effects on the level of surface water and subsurface wells. During the deficitary cycles of 1981-1982 (runoff = 374 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) and 1982-1983 (runoff = 254 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), the sediment load delivered to the sea by the river Senegal ranged from 2.8 to 1.2 megatons per year and the mean concentration of suspended solids from 252 to 196 mg/l. Clay minerals (kaolinite and smectite) are dominant. The yearly flux of organic matter from the continent is low, amounting only up 1.7 weight % of the solid transport. New hypothesis are developed in order to better understand the process of solid load uptake by sahelian rivers.

Senegal river, Africa, Water budget, Sediment load, Chemical composition, Mineralogical composition

### INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, de nombreuses études ont été entreprises sur les flux saisonniers de matières dissoutes et particulaires acheminées par les grandes rivières sahéliennes vers les dépressions endoréiques (Chari, Logone), les cuvettes semi-fermées (Niger) ou, cas le plus fréquent, vers les océans (Bandama, Gambie, Comoé ...). Assez paradoxalement, le Sénégal, septième artère fluviale de l'Afrique par l'importance de ses écoulements, est resté en marge des grands courants de recherche sur les altérations continentales et la dynamique des paysages sur les grands bassins versants.

En 1979, l'ORSTOM mit sur pied un vaste programme de recherches multidisciplinaires sur les fleuves Sénégal et Gambie, dont l'un des objectifs essentiels consistait à quantifier les flux de matières tout le long de ces deux axes hydrographiques. Les études entreprises à l'exutoire amont de la Gambie (Goulombou) ont été récemment présentées (Lô, 1984). Sur le Sénégal, les premières mesures furent réalisées à Bakel, puis progressi-

\* ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), Centre de Hann, BP 1386, Dakar, Sénégal.

\*\* Laboratoire de Géographie physique de l'Université de Nancy II, 23 boulevard Albert 1er, BP 33-97, Nancy Cedex, France.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 23692 ex. 1

Cote : B  
Date : 870601

vement, le réseau d'observations se développa vers l'aval. En 1981, l'ensemble du dispositif de contrôle était fonctionnel dans toute la vallée du fleuve. Il comprenait, outre la station de Bakel, celles de Saldé, Ngoui, Podor, Guédé, Dagana et St Louis.

Après quatre années de mesure, toutes caractérisées par des déficits hydropluviométriques importants sur le bassin versant, nous présentons aujourd'hui en deux parties les premières évaluations sur les héritages de l'amont à la station de St Louis que l'ont peut géographiquement assimiler à l'embouchure du fleuve Sénégal.

Il paraît cependant illusoire de vouloir saisir la réalité des flux dissous et particulaires si, au préalable, le bilan de l'eau qui les achemine n'est pas établi avec toute la rigueur souhaitable. Aussi, avant de présenter les résultats chiffrés sur l'importance relative actuelle de l'érosion mécanique et de l'altération chimique dans le bassin du Sénégal, l'originalité des hydrogrammes de crue des dernières années est soulignée dans le contexte général des enregistrements depuis 1903.

## I — LE BILAN DE L'EAU SUR LE BASSIN VERSANT DU SÉNÉGAL

Parmi tous les fleuves sahéliens, le Sénégal est celui qui dispose de la plus longue série d'observations limnimétriques. Grâce, en effet, à l'effort de valorisation des données anciennes entrepris par ROCHETTE (1974), l'information est complète sur l'importance des écoulements depuis 1903 aux deux stations-clefs de Bakel à l'amont et de Dagana à l'aval (fig. 1). La station de Bakel à l'exutoire du haut-bassin est exploitée sans interruption depuis 1901 ; le zéro de l'échelle d'observation actuelle est la cote 11,16 m IGN. A notre connaissance, il n'existe aucune tentative d'évaluation des écoulements du fleuve Sénégal à son embouchure à partir des seuls enregistrements fragmentaires du marégraphe de St Louis. Il est désormais communément admis que l'unique possibilité consiste à les identifier quotidiennement à ceux de Dagana (située à 192 km de l'embouchure) en faisant abstraction du temps de parcours entre les deux stations. A Dagana, les relevés du plan d'eau fluvial datent de 1904 ; les principales lacunes dans les observations concernent la période des basses-eaux lorsqu'en fin de saison sèche la section est soumise au phénomène journalier de la marée. Le zéro de l'échelle actuelle est à la cote — 0,44 m IGN.

### 1. Le régime du fleuve Sénégal

FRECAUT (1982) a classé le Sénégal dans les « régimes pluviaux tropicaux humides » qui suivent le rythme pluviométrique saisonnier en mimant avec un faible décalage la répartition des précipitations sur les zones amont d'alimentation. Le régime du Sénégal se caractérise par deux saisons bien différenciées : (1) une période de hautes-eaux de juin-juillet à octobre-novembre, avec une pointe de crue se situant généralement dans la seconde quinzaine de septembre ou dans les tous premiers jours d'octobre ; (2) une période de basses-eaux, de novembre-décembre à mai-juin, pendant la saison sèche, avec une décroissance régulière des débits.

Du Fouta-Djalon, où le Sénégal prend sa source, à l'embouchure du fleuve, on distingue trois sous-régimes caractéristiques : tropical humide de « transition », tropical « pur » et sahélien.

Le régime tropical humide de « transition » affecte une superficie de 28 000 km<sup>2</sup> où les pluies annuelles sont supérieures à 1250 mm. Il concerne les hauts-bassins des trois branches-mères du Sénégal : le Bafing, le Bakoye et la Famélé. Les écoulements y sont soumis à des variations très brutales ; les maximums et les minimums mensuels se présentent à des dates très irrégulières. Les réserves en eau du sol et du sous-sol sont réduites ; les étiages sont très prononcés.

Le régime tropical humide « pur » règne sur une surface de 108 000 km<sup>2</sup> (45 % du bassin). Les pluies annuelles sont comprises entre 1250 mm et 750 mm et très souvent inférieures à 1000 mm. Il s'étend sur les cours inférieurs des trois affluents et sur la totalité du bassin de la Baoulé. Les hautes-eaux, qui durent de trois à quatre mois (maximum en septembre-octobre), se poursuivent par une très longue saison des basses-eaux où persiste un faible écoulement.

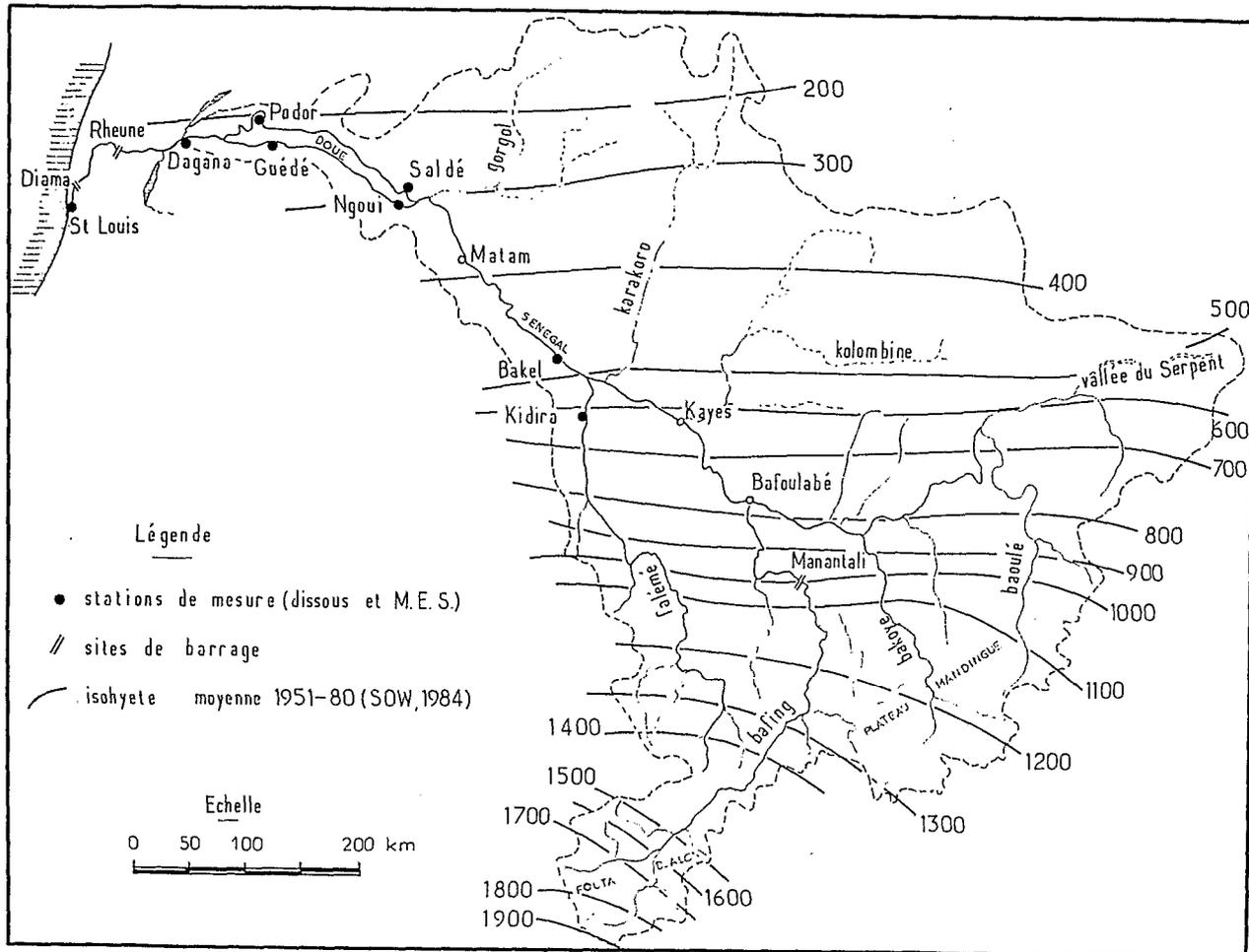


Fig. 1 — Situation géographique du bassin versant du Sénégal.  
Map of Senegal river showing locations where sediments were measured since 1980.

Le régime sahélien englobe toute la zone où la pluviométrie est inférieure à 750 mm (134 000 km<sup>2</sup>, 40 % de la superficie totale du bassin) : il s'étend à la totalité du bassin de la Kolombine, du Karakoro, du Gorgol et à la vallée du Serpent pour le Baoulé. Les apports de ces régions sont négligeables, les écoulements devenant de plus en plus sporadiques au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le Nord. En aval de Bakel, le régime reflète les conditions hydrologiques de l'amont avec des modifications mineures introduites par la présence de vastes plaines d'inondation, de nombreux défluent, l'absence d'affluents à écoulements importants et par les processus d'évapotranspiration. Dans toute la basse vallée, le Sénégal se comporte comme « un élément étranger en domaine sahélien où son régime diffère fondamentalement de celui des cours d'eau indigènes » (FRECAUT, 1982).

## 2. L'abondance fluviale

### a) Bilan moyen annuel des écoulements

C'est à ROCHETTE (1974) que l'on doit la valorisation des anciens relevés et la meilleure estimation possible des écoulements du Sénégal aux deux stations principales de Bakel et de Dagana depuis l'origine des observations communes en 1903 jusqu'en 1965. Les travaux plus récents des hydrologues de l'ORSTOM (GUIGUEN et LERIQUE, 1977, et surtout OLIVRY, 1982, 1983) ont conduit à affiner considérablement l'étalonnage de la station de Bakel en précisant la non-univocité de la courbe de tarage (c'est-à-dire les relations différentes entre hauteurs d'eau et débits en crue et en décrue).

Tableau I  
Débits moyens mensuels et annuels (m<sup>3</sup>/s) à Bakel. Valeurs estimées ( )  
Monthly and yearly mean runoff (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) at Bakel. Estimated values ( )

Cycle Hydrologique	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Module
1903 - 1904	(10)	(120)	746	1937	2535	1060	476	(202)	(124)	(74)	(40)	(15)	(631)
1904 - 1905	(10)	( 29)	682	2626	3187	1113	583	272	144	86	(50)	(22)	(737)
1905 - 1906	(10)	(235)	(919)	2740	2284	2381	1077	(375)	(192)	(113)	(64)	(30)	(874)
1906 - 1907	(15)	(143)	1121	5831	4186	1607	825	(465)	(250)	(140)	(80)	(40)	(1233)
1907 - 1908	(10)	(120)	(403)	905	2194	1282	613	(340)	(185)	(110)	(62)	(28)	(521)
1908 - 1909	(10)	81	799	2195	3691	1395	(500)	(235)	(130)	(75)	(42)	(18)	(7671)
1909 - 1910	(10)	(286)	949	2967	4144	1296	590	(255)	(140)	(83)	(46)	(20)	(902)
1910 - 1911	(10)	(120)	(590)	2134	3004	1221	472	(215)	(120)	(70)	(38)	(16)	(670)
1911 - 1912	(10)	(120)	(590)	1455	2439	930	431	(220)	(125)	(72)	(38)	(16)	(537)
1912 - 1913	(10)	(120)	(590)	1425	2348	1305	(436)	(230)	(135)	(78)	(43)	(18)	(564)
1913 - 1914	(10)	(120)	(333)	704	918	680	(251)	(121)	( 64)	(30)	(10)	( 4)	(272)
1914 - 1915	(10)	(120)	(590)	(1323)	1423	1035	(360)	(200)	(115)	(70)	(40)	(16)	(444)
1915 - 1916	(10)	( 90)	636	1896	2442	1261	(350)	(190)	(105)	(62)	(34)	(12)	(592)
1916 - 1917	( 5)	( 4)	726	1782	3223	1664	(400)	(210)	(120)	(70)	(38)	(16)	(691)
1917 - 1918	(10)	( 20)	(293)	(2130)	3393	1185	(330)	(185)	(100)	(58)	(32)	(11)	(647)
1918 - 1919	(10)	(200)	836	3147	5216	2573	(645)	(335)	(202)	(122)	(65)	(30)	(1144)
1919 - 1920	(10)	(140)	(404)	(1704)	2261	1026	(356)	(210)	(115)	( 70)	(38)	(15)	(530)
1920 - 1921	(10)	(120)	(540)	2535	4252	1311	596	(290)	(160)	( 95)	(52)	(23)	(834)
1921 - 1922	(10)	(120)	(396)	(1201)	(2100)	736	(270)	(150)	( 90)	( 50)	(26)	(10)	(431)
1922 - 1923	(10)	( 40)	402	3213	6746	2778	778	316	158	( 95)	(53)	(23)	(1219)
1923 - 1924	(10)	( 90)	628	(1808)	3764	1463	741	272	138	( 80)	(44)	(19)	(754)
1924 - 1925	(10)	(144)	1385	(3973)	5300	2463	796	384	(210)	(125)	(70)	(32)	(1247)
1925 - 1926	(14)	101	397	2280	3275	2506	765	(325)	(185)	(110)	(65)	(30)	(841)
1926 - 1927	(10)	(140)	(507)	(1607)	1741	(973)	715	270	(130)	( 76)	(43)	(18)	(521)
1927 - 1928	(10)	(120)	(777)	2800	4745	(2743)	878	(380)	(205)	(120)	(70)	(32)	(1075)
1928 - 1929	(10)	( 50)	351	2973	4568	1679	696	(240)	(130)	( 77)	(39)	(15)	(904)
1929 - 1930	(10)	(300)	864	2948	4399	1340	434	(217)	(123)	( 71)	(38)	(15)	(899)
1930 - 1931	(10)	(170)	(649)	(2621)	(3412)	(1929)	605	(290)	(167)	( 97)	(58)	(25)	(839)
1931 - 1932	(10)	(170)	940	1755	2715	2119	550	(270)	(155)	( 90)	(50)	(22)	(739)
1932 - 1933	(10)	(130)	(780)	2780	3181	1369	(445)	(227)	(130)	( 75)	(43)	(19)	(770)
1933 - 1934	(10)	(153)	1087	3302	3571	1066	(386)	(200)	(115)	( 68)	(35)	(12)	(836)
1934 - 1935	(10)	( 20)	270	2339	3496	1315	(440)	(220)	(130)	( 75)	(43)	(19)	(700)
1935 - 1936	(10)	(120)	(896)	(4269)	(4971)	2487	(630)	(265)	(152)	( 88)	(50)	(20)	(1166)
1936 - 1937	(10)	( 85)	599	4593	(5825)	2261	707	334	172	105	62	(25)	(1236)
1937 - 1938	(10)	(120)	397	1748	3108	1339	504	(230)	(130)	( 75)	(41)	(17)	(645)
1938 - 1939	(10)	(120)	479	1826	3995	1870	800	(270)	(150)	( 88)	(48)	(21)	(808)
1939 - 1940	(2,3)	( 28)	362	1935	2089	1377	(435)	(220)	(125)	( 72)	(40)	(16)	(560)
1940 - 1941	(10)	( 50)	210	1316	1343	1254	(529)	(200)	(120)	( 68)	(38)	(15)	(432)
1941 - 1942	(10)	(120)	339	1158	2115	740	(247)	(130)	( 75)	( 44)	(19)	(6,5)	(418)
1942 - 1943	(10)	(120)	385	1896	1715	539	(266)	(140)	( 80)	( 45)	(25)	8	(438)
1943 - 1944	(10)	(120)	366	1867	2951	1801	443	(195)	(110)	( 65)	(35)	14	(666)

A Dagana, que l'on substitue à St Louis pour évaluer les apports d'eau douce à l'embouchure, les écoulements sont déterminés en période de crue et partiellement en décrue par un faisceau de courbes d'étalonnage. Lorsqu'à cette station le niveau du plan d'eau descend en dessous de 1,20 m (+ 0,76 m IGN), la phase de tarissement est presque totalement masquée par les oscillations sinusoïdales introduites par l'onde de marée. Pendant toutes les basses-eaux, les débits ne peuvent alors être évalués qu'en estimant le temps de propagation de l'écoulement depuis les stations situées plus en amont. La formule de propagation des écoulements dans la vallée, en l'absence de débordements vers les plaines avoisinantes (ici entre Bakel et Dagana), a été établie par ROCHETTE (1974) :

$$Q_{D_1} = -0,2 Q_{B_1} + 0,28 Q_{B_0} + 0,92 Q_{D_0}$$

$Q_{B_0}$  et  $Q_{D_0}$  représentent respectivement les débits à Bakel et à Dagana le jour  $j$  (ce jour  $j$ , variable chaque année, correspond au jour où le débit à Dagana devient inférieur à 600 m<sup>3</sup>/s) ;  $Q_{B_1}$  et  $Q_{D_1}$ , les débits dans les mêmes sections à l'instant  $j + 1$  avec :

$$Q_{B_1} = Q_{B_0} - \Delta Q \text{ (en période de tarissement } Q_{B_1} < Q_{B_0} \text{)}$$

$$Q_{D_1} = -0,2 (Q_{B_0} - \Delta Q) + 0,28 Q_{B_0} + 0,92 Q_{D_0} = 0,08 Q_{B_0} + 0,2 \Delta Q + 0,92 Q_{D_0}$$

Tableau I (fin)

Cycle Hydrologique	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Module
1944 - 1945	(10)	(120)	225	814	1444	663	(339)	(160)	(95)	( 55)	(28)	10	(331)
1945 - 1946	(10)	(120)	396	3260	4738	1909	(464)	(195)	(110)	( 65)	(35)	14	(946)
1946 - 1947	(10)	(120)	362	2505	3024	1819	580	(238)	(130)	( 75)	(41)	17	(747)
1947 - 1948	(10)	(120)	343	1860	3363	1509	(397)	(180)	(105)	( 60)	(32)	(12)	(666)
1948 - 1949	( 5)	( 31)	(591)	1836	2656	961	398	(168)	(105)	( 60)	(32)	(12)	(573)
1949 - 1950	( 5)	( 9)	325	2052	1912	(809)	(216)	(123)	( 73)	( 42)	(20)	(10)	(469)
1950 - 1951	( 5)	( 3)	545	2914	5891	3071	778	304	153	86	43	13	1154
1951 - 1952	( 4)	57	387	1418	2331	3581	1455	423	214	125	(64)	(27)	843
1952 - 1953	( 5)	22	524	1395	2421	3126	(597)	(246)	(134)	( 71)	37	17	721
1953 - 1954	3	101	788	1547	2926	1236	464	219	140	81	41	13	632
1954 - 1955	12	253	963	3987	4419	1655	681	396	197	116	68	42	1070
1955 - 1956	32	207	612	3563	4004	2615	770	347	203	119	69	34	1051
1956 - 1957	13	40	495	2210	5237	2159	634	285	163	99	60	24	953
1957 - 1958	8	215	608	2668	4227	2904	935	351	197	118	67	32	1031
1958 - 1959	18	175	568	3985	4028	1916	785	444	237	139	84	40	1040
1959 - 1960	(19)	164	583	2434	4047	1242	489	223	126	76	42	17	788
1960 - 1961	5	82	789	1790	2508	1301	504	213	120	75	41	16	623
1961 - 1962	3,5	102	781	2956	5201	1360	458	207	121	74	40	12	945
1962 - 1963	2,7	85	511	2220	3632	1620	594	262	138	86	43	18	770
1963 - 1964	8	7	473	1620	2772	1988	636	230	129	72	36	13,8	667
1964 - 1965	(3,2)	171	602	1973	5680	1989	580	285	166	105	58	26	970
1965 - 1966	9,3	84	509	3272	5362	2053	648	289	170	103	57	28	1049
1966 - 1967	10,9	76	366	1379	2817	3902	852	319	173	105	61	27	841
1967 - 1968	11,3	89	560	2420	5035	2796	764	344	211	133	77	36	1040
1968 - 1969	16,6	76,7	421	1010	1800	853	301	169	93,3	54,8	27,1	8,01	404
1969 - 1970	2,64	71,4	683	1650	3150	2040	947	308	157	92,9	50,5	24,5	767
1970 - 1971	5,47	29,6	297	2250	2500	791	284	144	85	52,6	27,7	10,2	542
1971 - 1972	3,95	2,89	481	2530	2740	810	281	131	75,6	46,4	20,8	3,18	598
1972 - 1973	0,97	43	291	795	1060	499	218	106	54,2	27,0	9,24	1,83	264
1973 - 1974	0,34	126	327	1670	1360	497	180	72,6	39,6	18,6	7,04	1,11	360
1974 - 1975	0,60	3	739	3236	3138	1321	371	143	59,7	34,1	14,4	4,2	760
1975 - 1976	1,2	0,3	552	1586	3281	1158	382	149	60,7	34,4	14,1	2,5	602
1976 - 1977	0,72	4,5	480	1528	1155	1162	890	226	88,5	44,9	19,8	5,84	470
1977 - 1978	1,40	1,7	230	841	1728	752	211	61	32,2	12,8	3,2	0,9	324
1978 - 1979	0,71	7,8	359	1761	1892	1314	462	153	67,9	31,5	9,7	2,85	523
1979 - 1980	1,7	42,3	308	991	1263	573	293	98	43,2	17,3	4,2	1,43	303
1980 - 1981	0,56	21,6	317	1620	2030	476	191	83,3	38,1	15,4	4,5	1,28	402
1981 - 1982	0,35	34,8	441	1889	1680	639	222	84,4	42,9	16,6	5,1	1,43	423
1982 - 1983	0,57	0,34	250	1165	1322	540	217	65,7	34,0	14,3	3,92	1,31	303
1983 - 1984	0,54	77,7	390	697	817	425	134	52,4	25,9	10,4	3,52	1,53	219,6
Moyenne	8,20	96,3	552	2188	3147	1537	530	232	127	74,2	40,3	16,9	715,1

le terme  $0,2 \Delta Q$  étant négligeable devant  $Q_{B_0}$  (il ne représente lors du tarissement que de 0 % à 5,8 % de  $Q_{B_0}$ ) :

$$Q_{D_1} = 0,08 Q_{B_0} + 0,92 Q_{D_0} \text{ (formule simplifiée).}$$

Il est certain que les écoulements dans le bief aval ne peuvent qu'être estimés. Ceci tient d'abord aux difficultés liées à leur évaluation en période de tarissement et ensuite à l'impossibilité de les préciser lorsque la nouvelle onde de crue atteint déjà Bakel à l'amont, alors que la précédente manifeste toujours ses effets à Dagana. On dispose ainsi d'une série de valeurs complètes de 1903-1904 à 1983-1984, période d'observation de 81 années, la plus longue sur un fleuve de la frange sahélienne (tabl. I et II). A Bakel, le module moyen interannuel s'élève à  $715 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit un écoulement moyen de  $22,06 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$  ; à Dagana, le module moyen interannuel est de  $641 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondant à un écoulement moyen de  $20,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ .

#### b) Variabilités interannuelle, mensuelle et journalière

L'irrégularité dans les écoulements constitue la caractéristique principale des fleuves sahéliens, et le Sénégal n'échappe pas à cette règle : depuis 1903, les débits à Bakel ont varié dans le rapport de 1 à 5,7 et de 1 à 4,3 dans le bief aval de Dagana.

Tableau II  
Débits moyens mensuels et annuels ( $m^3/s$ ) à Dagana. Valeurs estimées ( )  
Monthly and yearly mean runoff ( $m^3.s^{-1}$ ) at Dagana. Estimated values ( )

Cycle Hydrologique	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Module
1903 - 1904	(15)	(30)	(400)	1162	1951	2035	(750)	(320)	(180)	(110)	(60)	(30)	(588)
1904 - 1905	(15)	(15)	(389)	1580	2217	2199	998	(400)	(220)	(130)	(75)	(40)	(693)
1905 - 1906	(18)	(87)	(513)	1450	1936	2153	1992	(600)	(230)	(130)	(75)	(40)	(771)
1906 - 1907	(20)	(42)	(617)	1765	2840	2755	1761	461	(250)	(145)	(80)	(40)	(901)
1907 - 1908	(20)	(15)	(245)	683	1534	1671	738	471	(280)	(160)	(90)	(45)	(497)
1908 - 1909	(20)	(20)	(485)	1328	2107	2450	(1287)	(390)	(195)	(110)	(65)	(35)	(700)
1909 - 1910	(20)	(43)	774	1607	2357	2595	1376	(430)	(210)	(120)	(65)	(35)	(806)
1910 - 1911	(20)	(87)	591	1335	2095	2352	(999)	(340)	(180)	(100)	(60)	(30)	(686)
1911 - 1912	(15)	(30)	(400)	992	1778	1732	(719)	(350)	(185)	(105)	(60)	(30)	(534)
1912 - 1913	(15)	(15)	(359)	1050	1663	1842	(815)	(380)	(205)	(115)	(65)	(35)	(549)
1913 - 1914	(20)	(30)	(200)	(543)	1066	910	(400)	(170)	(80)	(45)	(20)	(12)	(292)
1914 - 1915	(12)	((12))	((450))	(993)	1448	1288	(555)	(310)	(170)	(105)	(60)	(30)	(455)
1915 - 1916	(15)	(50)	(490)	(1136)	(1937)	(2054)	(700)	(320)	(160)	(90)	(50)	(25)	(587)
1916 - 1917	(12)	(6)	(421)	1268	1915	2303	1271	(300)	(175)	(105)	(60)	(30)	(658)
1917 - 1918	(12)	(7)	(97)	1069	2087	2405	(914)	(290)	(150)	(85)	(50)	(25)	(602)
1918 - 1919	(12)	(60)	(493)	1532	2343	3039	2000	(550)	(280)	(150)	(80)	(40)	(885)
1919 - 1920	(20)	(52)	(340)	1173	1859	1884	(708)	(300)	(170)	(100)	(60)	(30)	(559)
1920 - 1921	(15)	(60)	(699)	1262	2284	2676	(1294)	(400)	(240)	(140)	(75)	(40)	(769)
1921 - 1922	(20)	(20)	(318)	841	1744	1571	(466)	(225)	(130)	(75)	(45)	(20)	(458)
1922 - 1923	(20)	(20)	(392)	1276	2224	3140	2111	(620)	(240)	(140)	(80)	(40)	(862)
1923 - 1924	(20)	(35)	(558)	1273	1948	2358	1504	(451)	(205)	(120)	(65)	(35)	(716)
1924 - 1925	(25)	(100)	(896)	1702	2471	3088	2007	(616)	(330)	(190)	(100)	(50)	(969)
1925 - 1926	(25)	(59)	(494)	1201	1983	2384	2022	(520)	(280)	(160)	(95)	(45)	(773)
1926 - 1927	(22)	(24)	(435)	1168	1586	1468	(654)	(400)	(195)	(110)	(65)	(35)	(516)
1927 - 1928	(17)	(8)	(403)	1275	2077	2693	2359	(908)	(320)	(180)	(100)	(50)	(866)
1928 - 1929	(25)	(15)	(388)	1202	2220	2783	2002	(569)	(290)	(160)	(90)	(45)	(818)
1929 - 1930	(25)	(100)	749	1365	2235	2670	1722	(440)	(220)	(125)	(70)	(35)	(816)
1930 - 1931	(18)	(75)	(546)	1251	2185	2502	1723	(450)	(240)	(140)	(80)	(40)	(773)
1931 - 1932	(20)	(38)	(597)	1500	1734	2184	1514	(411)	(230)	(130)	(75)	(40)	(708)
1932 - 1933	(20)	(51)	(571)	1576	2245	2546	1240	(350)	(190)	(115)	(65)	(35)	(754)
1933 - 1934	(20)	(95)	820	1774	2448	2619	1115	(310)	(170)	(105)	(60)	(30)	(802)
1934 - 1935	(15)	(7)	(178)	1214	2180	2569	1459	(350)	(190)	(110)	(65)	(35)	(700)
1935 - 1936	(20)	(15)	(608)	1453	2345	2958	2044	(540)	(230)	(130)	(75)	(40)	(873)
1936 - 1937	(20)	(10)	(414)	1434	2606	3184	2096	(626)	(267)	(155)	(90)	(40)	(913)
1937 - 1938	(20)	(12)	(214)	1062	1934	2292	1299	(380)	(190)	(105)	(60)	(30)	(635)
1938 - 1939	(15)	(6)	(524)	1165	1941	2450	2120	(628)	(220)	(125)	(70)	(35)	(778)
1939 - 1940	(20)	(12)	(236)	1040	1886	2065	(1000)	(350)	(185)	(90)	(60)	(30)	(582)
1940 - 1941	(15)	(30)	(109)	(788)	1569	1396	925	(310)	(180)	(100)	(55)	(25)	(457)
1941 - 1942	(12)	(6)	(70)	807	1565	1487	(487)	(190)	(110)	(65)	(35)	(15)	(406)
1942 - 1943	(7)	(4)	(211)	1027	1768	1180	(380)	(180)	(110)	(65)	(40)	(15)	(417)
1943 - 1944	(12)	(8)	(262)	1107	1940	2292	1390	(300)	(160)	(95)	(55)	(25)	(638)

A Bakel, comme à Dagana, les valeurs extrêmes ont été observées au cours des mêmes cycles hydrologiques. Les écoulements maxima ont eu lieu en 1924-1925 ( $39,3 \cdot 10^9 m^3$  à Bakel et  $30,6 \cdot 10^9 m^3$  à Dagana) et les minima en 1983-1984 ( $6,9 \cdot 10^9 m^3$  à Bakel et  $7,1 \cdot 10^9 m^3$  à Dagana). Il est vraisemblable, au vu des enregistrements des hauteurs d'eau des derniers mois de juillet, août et septembre, que la crue 1984-1985 sera aussi faible, voire plus faible, que celle de 1983-1984.

A l'irrégularité interannuelle s'ajoute celle des débits moyens mensuels. A Bakel, le plus important débit moyen mensuel a été observé en septembre 1922 avec  $6\,746 m^3/s$ ; le plus faible au cours du même mois sera probablement celui de 1984, débit que l'on peut estimer de l'ordre de  $570 m^3/s$ ; à Dagana, le maximum moyen mensuel de  $3\,184 m^3/s$  a été enregistré en octobre 1936, le minimum sera vraisemblablement aussi celui d'octobre 1984.

Signalons enfin que sur la période de 81 ans, le plus fort débit journalier a été de  $9\,340 m^3/s$  en septembre 1936 à Bakel et de  $3\,570 m^3/s$  en octobre de la même année à Dagana (la différence importante constatée entre les deux stations met en relief le rôle régulateur joué par les plaines d'inondation).

Les figures 2 et 3 illustrent les variations observées dans les écoulements du Sénégal depuis le début du siècle; elles mettent en évidence, à l'amont comme à l'aval du bassin versant, la succession de périodes humides (avant 1910, de 1919 à 1939 et de 1950 à 1967) et d'épisodes arides (de 1911 à 1918, de 1940 à 1949 et depuis 1968).

Tableau II (fin)

Cycle Hydrologique	N	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Module
1944 - 1945	(12)	(6)	(134)	(642)	1351	1173	577	240	140	80	(45)	(20)	368
1945 - 1946	(10)	(40)	(250)	1278	2195	2843	1759	(400)	(180)	(95)	(55)	(25)	(764)
1946 - 1947	(15)	(8)	(163)	1185	2002	2386	1697	(420)	(200)	(110)	(65)	(30)	(692)
1947 - 1948	(15)	(7)	(206)	(1037)	1866	2135	(871)	(300)	(155)	(90)	(50)	(25)	(564)
1948 - 1949	(10)	(5)	(355)	1049	1874	1954	903	(340)	(155)	(90)	(50)	(25)	(569)
1949 - 1950	(10)	(10)	(170)	992	1867	1686	(521)	(210)	(120)	(70)	(40)	(20)	(478)
1950 - 1951	(12)	(5)	(316)	1220	2203	2986	2110	(726)	(212)	(125)	(65)	(30)	(837)
1951 - 1952	(21)	(30)	(285)	1018	1736	2210	2490	1415	(328)	(187)	(95)	(42)	(822)
1952 - 1953	(15)	(10)	(324)	1050	1646	2168	2218	(591)	(190)	(100)	(55)	(30)	(702)
1953 - 1954	(12)	(36)	(540)	1224	1771	2091	(1039)	(350)	(200)	(120)	(60)	(25)	(625)
1954 - 1955	(25)	(152)	(646)	1613	2327	2652	1625	(501)	(285)	(180)	(100)	(60)	(850)
1955 - 1956	(30)	(93)	(533)	1571	2275	2778	2268	(743)	(292)	(196)	(100)	(55)	(912)
1956 - 1957	(25)	(12)	(337)	1177	2070	2880	2063	(537)	(243)	(133)	(80)	(40)	(805)
1957 - 1958	(25)	(24)	(611)	1272	2135	2703	2408	(910)	(291)	(171)	(95)	(50)	(894)
1958 - 1959	(30)	(53)	570	1367	2328	2967	1993	(650)	(325)	(214)	(113)	(60)	(892)
1959 - 1960	(18)	(83)	(492)	1075	1986	2505	1414	(345)	(217)	(128)	(70)	(30)	(698)
1960 - 1961	(15)	(7)	(489)	1282	1859	2097	1109	(322)	(192)	(107)	(60)	(25)	(633)
1961 - 1962	(15)	(7)	(460)	1499	2208	2695	1440	(332)	(172)	(105)	(60)	(25)	(755)
1962 - 1963	(10)	(12)	(383)	1236	1978	2459	1763	(451)	(228)	(124)	(65)	(30)	(731)
1963 - 1964	(15)	(7)	(149)	1192	1798	2181	1778	(423)	(200)	(110)	(55)	(25)	(661)
1964 - 1965	(15)	(47)	(497)	1420	2135	2871	2138	(473)	(250)	(155)	(85)	(40)	(847)
1965 - 1966	15	15	300	1220	2210	3130	2000	400	220	130	70	35	822
1966 - 1967	(15,0)	(15,0)	(350)	919	1708	2325	2634	1081	246	135	80,3	40,7	798
1967 - 1968	15,5	(50)	(450)	1330	2149	3017	2923	(979)	296	166	104,4	52,9	962
1968 - 1969	(23,9)	(40,0)	(400)	940	1315	1348	479	222	121	70,4	37,2	15,0	420
1969 - 1970	(4,82)	(1,20)	(475,4)	1210	1910	2300	2010	(757)	(239)	(121)	(69,2)	34,0	764
1970 - 1971	12,6	(30)	(300)	1238	1996	1925	577	208	108,0	65,7	38,2	16,8	546
1971 - 1972	6,40	2,04	(500)	1234	2073	2067	557	184	97,3	58,6	31,7	9,15	570
1972 - 1973	1,94	1,00	(300)	678	1013	635	362	149	74,2	37,5	16,1	4,63	274
1973 - 1974	0,90	(100)	494	1023	1590	879	300	111,2	54,2	26,7	12,1	3,06	385
1974 - 1975	1,0	1,0	(320)	1183	1995	2104	740	224	86,3	45,3	22,5	7,93	564
1975 - 1976	2,37	0,68	(300)	1214	1599	1746	607	227	91,7	46,8	21,1	6,36	490
1976 - 1977	(1,40)	(2,0)	(300)	963	1102	1009	776	313	135	63,1	30,0	11,1	394
1977 - 1978	(2,8)	(1,2)	(150)	(504)	982	912	347	112	45,8	19,8	7,04	1,77	258
1978 - 1979	(0,85)	(0,50)	(200)	1044	1277	1271	587	309	98,2	47,5	17,7	5,75	407
1979 - 1980	1,92	(1,2)	(167)	731	1013	605	423	173	63,5	28,1	9,06	2,53	269
1980 - 1981	1,0	0,4	(300)	945	1362	808	270	123,4	54,7	25,0	8,69	2,55	327
1981 - 1982	(0,70)	(0,3)	(150)	1131	1566	970	404	143	60,8	27,9	9,76	2,88	374
1982 - 1983	0,91	0,49	156	637	1109	637	313	114	47,7	21,3	7,70	2,12	254
1983 - 1984	0,75	(0,12)	(340)	591	734	638	252	85,0	37,2	16,6	6,00	2,34	226
Hoyenne	14,8	28,5	393	1167	1884	2111	1280	408	181	101	54,8	26,9	641,3

Depuis 1968, le module moyen interannuel du fleuve Sénégal n'a pas cessé de diminuer : de 771 m<sup>3</sup>/s en 1968, il est successivement passé à 765 m<sup>3</sup>/s en 1971, à 747 m<sup>3</sup>/s en 1975, à 736 m<sup>3</sup>/s en 1977, à 733 m<sup>3</sup>/s en 1979 (FAURE et GAC, 1981), pour s'établir à 715 m<sup>3</sup>/s en 1983. La persistance de conditions climatiques défavorables permet d'affirmer qu'en 1985 le module moyen interannuel du fleuve Sénégal à l'exutoire amont n'excèdera pas la valeur de 710 m<sup>3</sup>/s.

### c) Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle

Les médias, comme l'a récemment souligné OLIVRY (1982), « ont peut-être indiqué un peu trop vite l'année 1972 comme le cœur de la sécheresse actuelle ». Cette affirmation a été démentie par les derniers enregistrements sur les biennales 1983-1984 et 1984-1985 qui constituent, pour l'instant, les années les plus déficitaires sur toute la période d'observation.

Les modules du Sénégal à Bakel et à Dagana au cours des 17 derniers cycles hydrologiques et les écarts à la normale sont reportés dans le tableau III. En ce moment, le cycle 84-85 s'achève et on peut évaluer que les écoulements seront de l'ordre de 215 m<sup>3</sup>/s. A deux exceptions près, toutes les années sont largement déficitaires depuis 1968. Le caractère exceptionnel de la sécheresse actuelle apparaît encore plus nettement en comparant les

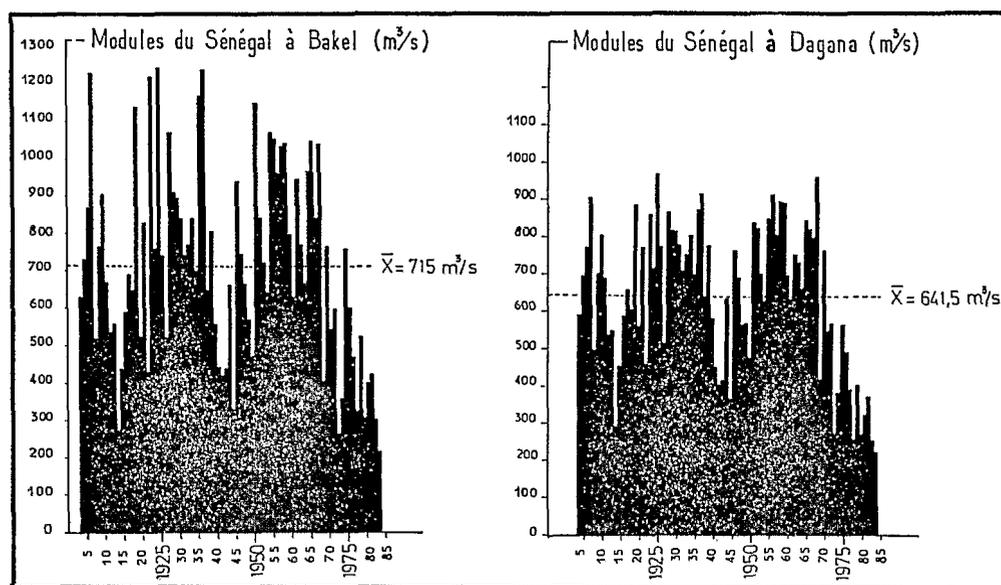


Fig. 2 — Evolution des écoulements du Sénégal depuis 1903.  
Evolution of water discharge since 1903.

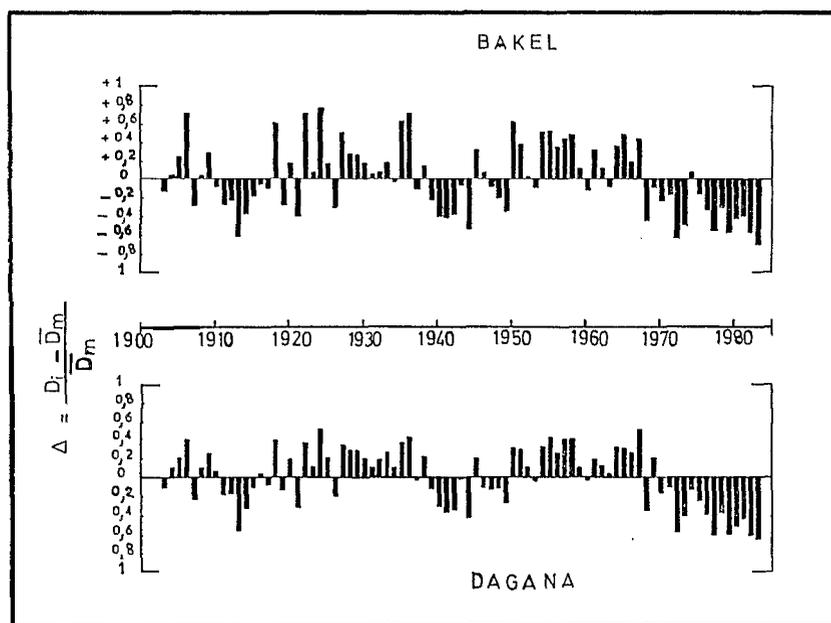


Fig. 3 — Variations des écarts à la normale depuis 1903 ( $D_i$  : module annuel,  $D_m$  : module interannuel).  
Variation of standard deviation since 1903 ( $D_i$  : annual discharge,  $D_m$  : mean interannual runoff).

mesures récentes à l'échantillon des observations sur 81 ans. Le classement des modules dans l'ordre croissant donne la succession suivante :

Bakel : 1984, 1983, 1972, 1913, 1979, 1982, 1977, 1944, 1973, 1980 (soit 8 années récentes sur 10) ;  
Dagana : 1984, 1983, 1982, 1977, 1979, 1972, 1913, 1980, 1944, 1981 (également 8 années récentes sur 10).

Tableau III  
 Modules ( $m^3/s$ ) et écart à la normale depuis 1968  
 Modules ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) and standard deviation since 1968

BAKEL						DAGANA					
Année	M ( $m^3/s$ )	Ecart (%)	Année	M ( $m^3/s$ )	Ecart (%)	Année	M ( $m^3/s$ )	Ecart (%)	Année	M ( $m^3/s$ )	Ecart (%)
1968-69	404	-43,5	1976-77	470	-34,3	1968-69	420	-34,5	1976-77	394	-38,5
1969-70	767	+ 7,3	1977-78	324	-54,7	1969-70	764	+19,2	1977-78	258	-59,8
1970-71	542	-24,2	1978-79	505	-29,4	1970-71	546	-14,8	1978-79	407	-36,5
1971-72	598	-16,4	1979-80	303	-57,6	1971-72	570	-11,1	1979-80	269	-58,0
1972-73	264	-63,1	1980-81	402	-43,8	1972-73	274	-57,3	1980-81	327	-49,0
1973-74	360	-49,7	1981-82	423	-40,8	1973-74	385	-40,0	1981-82	374	-41,7
1974-75	760	+ 6,3	1982-83	303	-57,6	1974-75	564	-12,0	1982-83	254	-60,4
1975-76	602	-15,8	1983-84	220	-69,2	1975-76	490	-23,6	1983-84	226	-64,7

Depuis 1979, le déficit à l'amont comme à l'aval du bassin a été supérieur à 40 %. L'effet de cumul de cette succession sans répit d'années à faible écoulement s'est traduit par une baisse importante du niveau des nappes souterraines et, en corollaire, par une phase « d'épuisement du fleuve » de plus en plus précoce dans l'ensemble de la vallée, puis par une intrusion saline d'une ampleur et d'une durée exceptionnelles dans le delta.

La comparaison des modules aux exutoires amont et aval du bassin versant du Sénégal (fig. 4) permet de tirer les enseignements suivants :

- à quelques exceptions près, les écoulements à l'aval sont inférieurs ou égaux à ceux de l'amont ;
- il existe une très bonne corrélation entre les modules aux deux stations pour des débits compris entre 400 et 850  $m^3/s$  ;
- en années très humides (module supérieur à 900 - 1000  $m^3/s$  à l'amont), les écoulements à l'aval du bassin tendent vers une valeur limite de l'ordre de 900 - 950  $m^3/s$  ;
- en années sèches, les volumes d'eau qui transitent au bief aval peuvent être supérieurs à ceux du bief amont ;
- la dernière décennie écoulée présente une tendance particulière et se singularise par une réduction considérable des écoulements à Dagana. On peut remarquer en effet que, depuis 1974, il existe une relation nouvelle entre les modules aux deux stations et que, pour des débits identiques à l'amont, la période actuelle se traduit par des écoulements moins importants à l'aval que dans le passé.

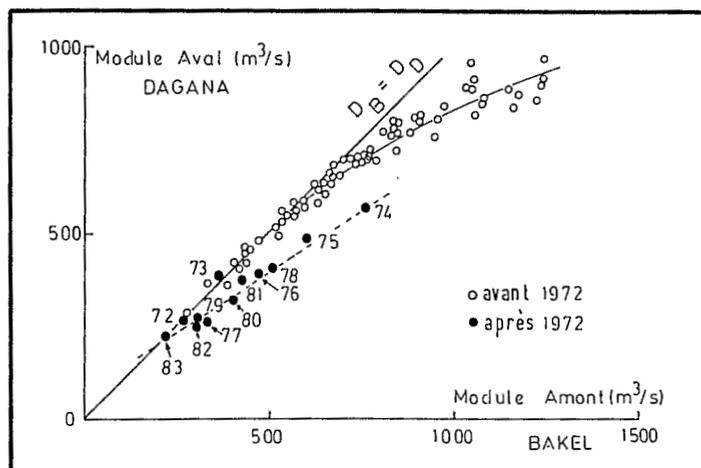


Fig. 4 — Relation entre les écoulements à Bakel et à Dagana.  
 Relation between annual water discharge at Bakel and Dagana.

Cette situation nouvelle met en évidence le rôle fondamental joué par les plaines d'inondation situées en bordure du réseau hydrographique. On perçoit l'effet de cumul d'une succession d'années déficitaires qui ont

provoqué l'assèchement de nombreux points d'eau et l'abaissement du niveau des nappes souterraines. Il est vraisemblable aujourd'hui que les réductions de volumes, constatées lors du cheminement des eaux dans la vallée, soient la conséquence directe des transferts à sens unique du fleuve vers les nappes souterraines, impuissantes ensuite à soutenir les débits d'étiage. Leur faible réalimentation annuelle traduit, bien plus que le réseau de surface, « l'insidieuse progression en profondeur » de la désertification vers les zones tropicales.

d) *Les maximums de la crue annuelle*

*Irrégularité et variabilité interannuelles des maximums*

Les débits et les hauteurs maxima enregistrés depuis 1903 aux stations de Bakel et de Dagana ont été reportés dans le tableau IV. Les cotes sont données par rapport aux zéros des deux échelles limnimétriques situées respectivement à + 11,16 m IGN à Bakel et - 0,44 m IGN à Dagana. En 1984, le plan d'eau à Dagana a atteint deux maxima (2,06 m le 24 juillet et 1,49 m le 28 août) : le premier correspond à la remontée du plan d'eau imposée par la présence du barrage de Rheune\*, le second à la pointe de crue habituelle après la rupture du barrage sous la poussée des eaux douces.

A Bakel, les valeurs extrêmes correspondent aux années 1906 et 1984 ( $Q_{\max}$  : 9 340 m<sup>3</sup>/s ;  $Q_{\min}$  : 995 m<sup>3</sup>/s ;  $H_{\max}$  : 13,28 m et  $H_{\min}$  : 4,38 m) : les débits maximums ont varié dans un rapport de 9,4 et les hauteurs maximales dans un rapport de 3. A Dagana, les plus importants écoulements journaliers et la cote maximale ont été observés en 1936 ( $Q_{\max}$  : 3 570 m<sup>3</sup>/s et  $H_{\max}$  : 4,94 ou 4,50 m IGN) ; l'année 1984 correspond aussi à une

Tableau IV  
Débits et hauteurs maximums à Bakel et à Dagana  
Maximum runoff and floodheight at Bakel and Dagana

Année	BAKEL		DAGANA		Année	BAKEL		DAGANA		Année	BAKEL		DAGANA	
	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)		Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)		Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)
1903	3560	9,49	2275	3,50	1930	4610	11,00	2590	3,88	1957	5660	11,82	2850	4,27
1904	4790	11,15	2410	3,65	1931	4300	10,70	2300	3,53	1958	8170	12,89	3100	4,46
1905	3840	10,19	2190	3,39	1932	4850	11,20	2680	4,01	1959	5460	11,68	2615	3,94
1906	9340	13,28	3370	4,75	1933	5490	11,70	2760	4,12	1960	3550	9,84	2160	3,37
1907	2850	8,90	1830	2,98	1934	5340	11,60	2680	4,02	1961	7030	12,51	2910	4,33
1908	4200	10,60	2505	3,75	1935	6680	12,35	3280	4,63	1962	4410	10,80	2560	3,78
1909	5490	11,70	2780	4,14	1936	7600	12,70	3570	4,94	1963	3760	10,11	2235	3,45
1910	3840	10,20	2460	3,70	1937	3590	9,90	2360	3,59	1964	7180	12,56	3190	4,52
1911	3330	9,55	2095	3,30	1938	5630	11,80	2585	3,83	1965	7000	12,48	3390	4,70-5,00
1912	3290	9,50	1935	3,10	1939	3400	9,65	2140	3,35	1966	5450	11,70	2800	4,04
1913	1040	5,20	1100	2,00	1940	2760	8,75	1625	2,72	1967	5820	11,94	3400	4,65
1914	1885	7,25	1460	2,50	1941	2890	8,95	1805	2,95	1968	2880	8,94	1660	2,80
1915	3140	9,30	(2190)	(3,40)	1942	3590	9,90	1870	3,02	1969	3770	10,11	2360	3,64
1916	4200	10,60	2360	3,60	1943	3480	9,75	2315	3,55	1970	3440	9,70	2170	3,43
1917	4960	11,30	2505	3,75	1944	1740	6,95	1510	2,56	1971	4320	10,72	2300	3,59
1918	7300	12,60	3200	4,55	1945	6480	12,26	3010	4,40	1972	1430	6,24	1070	2,00
1919	3560	9,85	2060	3,25	1946	4460	10,85	2430	3,68	1973	2550	8,38	1660	2,81
1920	5630	11,80	2785	4,15	1947	4360	10,75	2215	3,45	1974	5780	11,91	2310	3,60
1921	2850	8,90	1970	3,14	1948	3590	9,90	2095	3,30	1975	5000	10,14	1920	3,13
1922	9070	13,19	3540	4,89	1949	3760	10,10	2010	3,20	1976	2500	6,96	1340	2,29
1923	4670	11,05	2430	3,69	1950	7630	12,71	3390	4,77	1977	2700	7,06	(1330)	2,29
1924	6350	12,20	3290	4,65	1951	5340	11,60	2540	3,80	1978	3250	7,87	1435	2,52
1925	4610	11,00	2480	3,72	1952	5060	11,38	2450	3,69	1979	1760	6,20	1140	2,09
1926	2290	8,00	1745	2,87	1953	4180	10,58	2155	3,37	1980	3640	8,66	1565	2,66
1927	6460	12,25	2830	4,24	1954	6610	12,32	2920	4,32	1981	2840	7,74	1670	2,75
1928	5490	11,70	2920	4,34	1955	5260	11,54	2920	4,33	1982	2280	6,95	1300	2,20
1929	5490	11,70	2790	4,16	1956	6050	12,06	3160	4,49	1983	1200	4,92	(850)	1,58
										1984	995	4,34	(770)	1,49-2,06

\* Le barrage de Rheune, situé à 114 km de l'embouchure du fleuve (à 92 km de St Louis), fut édifié le 26 novembre 1983 à la suite de la crue déficitaire de 1983, afin de stopper la remontée précoce des eaux salées et d'assurer un meilleur remplissage du lac de Guiers. Premier lien de terre ferme entre le Sénégal et la Mauritanie, ce barrage fut emporté par la crue, le 23 juillet 1984. Rheune II était en place le 13 novembre 1984. Il est vraisemblable que le bouchon « sautera » à nouveau dès juillet 1985 et que Rheune III lui succèdera avant le barrage définitif de Diama (km 54) prévu pour août 1986.

défaillance, sans précédent connu, et la puissance des crues à l'aval du bassin ( $Q_{\min}$  : 770 m<sup>3</sup>/s environ et  $H_{\min}$  : 1,49 m ou 1,05 m IGN).

La sévérité de la sécheresse actuelle est aussi nettement perceptible au niveau des débits maximums des pointes de crue. A Bakel, la moyenne des maxima annuels des 16 dernières années s'élève à 2 970 m<sup>3</sup>/s pour une valeur de 4 370 m<sup>3</sup>/s sur 82 ans ; à Dagana, les résultats sont analogues : 1 570 m<sup>3</sup>/s en moyenne depuis 1968 et 2 330 m<sup>3</sup>/s pour les 82 années d'observation. A l'aval comme à l'amont, la réduction dans les écoulements est de l'ordre de 32 %.

### Formes des hydrogrammes

L'étude hydrologique montre que la période des hautes-eaux annuelles présente toujours la même configuration avec simplement des variations d'amplitude en fonction des années humides (1924-1925), des années moyennes (1962-1963) ou des années sèches (1983-1984) (fig. 5).

L'hydrogramme de crue aux deux stations est monomodal avec en général un seul épaulement en août/septembre et une longue courbe de tarissement d'octobre à mai. Après Bakel, la pente devient faible, la vitesse de propagation ralentit, les pulsations brutales du bassin supérieur s'atténuent, l'hydrogramme s'aplatit, et ce « laminage » s'explique par l'absence d'affluents importants le long de la vallée pour déterminer des pointes secondaires.

### 3. Les cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 dans le contexte général des enregistrements depuis 1903

#### a) Modules bruts ou absolus

Les cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 se sont traduits à l'embouchure du Sénégal par des modules respectifs de 374 m<sup>3</sup>/s et de 254 m<sup>3</sup>/s. Ces valeurs placent ces deux cycles parmi les dix plus faibles écoulements annuels depuis 1903. Le déficit par rapport aux écoulements moyens est de 42 % pour 1981-1982 et de 60 % pour 1982-1983.

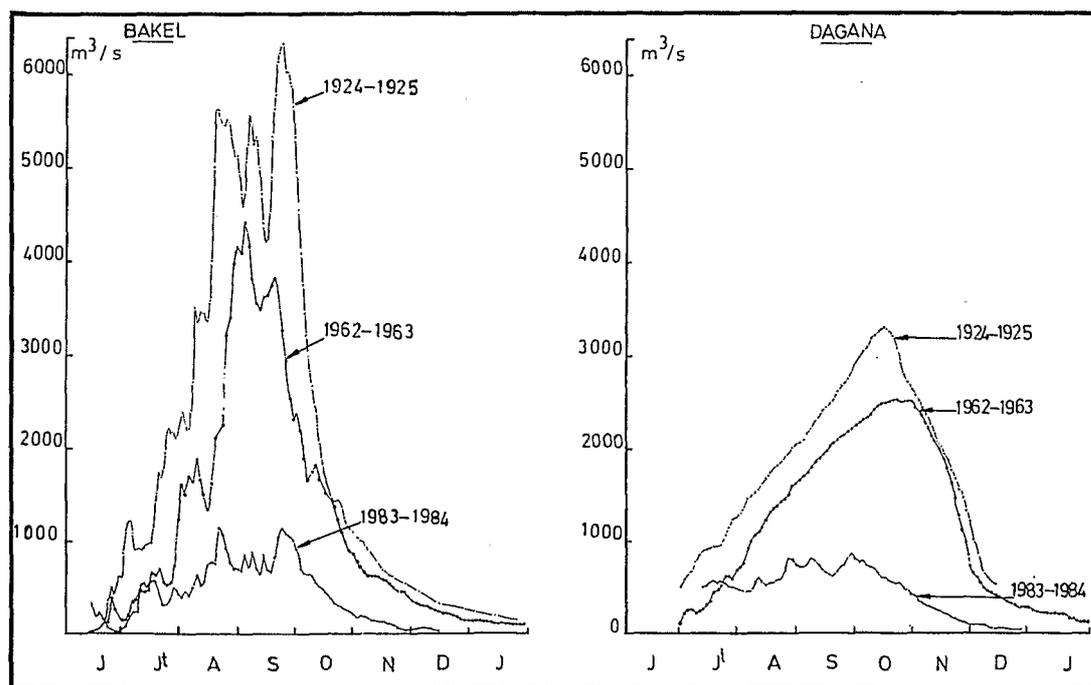


Fig. 5 — Différents types d'hydrogrammes de crue aux deux stations.  
Some aspects of river discharge.

**b) Les régimes saisonniers et les coefficients mensuels de débit (CMD)**

« Les variations saisonnières des débits fluviaux peuvent être perçues par divers modes d'expressions impliquant des représentations graphiques propres » (FRECAUT, 1982). Pour nos deux années de mesure, les variations dans les écoulements ont été précisées à partir des coefficients mensuels de débit (CMD) qui traduisent le rapport du module d'un mois considéré ( $Q_i$ ) au module moyen annuel ( $\bar{Q}$ ). Rappelons que lorsque le coefficient mensuel est supérieur à 1, on considère que le fleuve enregistre ses « hautes-eaux » ; si le coefficient est inférieur à l'unité, l'écoulement correspond à la période des « basses-eaux ».

Le tableau V récapitule les valeurs obtenues pour les deux cycles 81-82, 83-83, la période 1903-1984 et la dernière séquence sèche 1968-1984.

Tableau V  
Les coefficients mensuels de débit à l'embouchure du fleuve  
Monthly coefficient of runoff at the mouth of the river

Cycles Périodes	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A
1981-1982	< 0.01	< 0.01	(0.40)	3.02	4.19	2.59	1.08	0.38	0.16	0.07	0.03	< 0.01
1982-1983	< 0.01	< 0.01	(0.61)	2.51	4.34	2.51	1.23	0.45	0.19	0.08	0.03	< 0.01
1903-1984	0.02	0.04	0.61	1.82	2.94	3.29	2.00	0.64	0.28	0.16	0.09	0.04
1968-1984	< 0.01	0.03	0.74	2.34	3.47	3.05	1.38	0.53	0.22	0.11	0.05	< 0.01

La période des hautes-eaux est limitée à 4 mois (août, septembre, octobre et novembre). Sur les 81 années d'observations, on ne relève que 5 années où elle s'est prolongée jusqu'au mois de décembre. Les moyennes établies de 1903 à 1984 situent le maximum en octobre ; celui-ci se présente en septembre lors des années sèches. Cinq mois (de février à juin) ont un CMD < 0,01, traduisant de très fortes inégalités dans l'abondance et la répartition des précipitations et la sévérité des étiages.

**c) La faiblesse des crues en 1981-1982 et 1982-1983**

Nous avons représenté sur les figures 6, 7 et 8 les variations journalières des hauteurs d'eau et des débits correspondants à Dagana au cours des deux cycles hydrologiques. L'évolution quotidienne de la position du plan d'eau et celle des écoulements sont données dans les tableaux VI, VII, VIII et IX.

Le premier point qui mérite d'être souligné concerne la faiblesse des débits de pointe (1 670 m<sup>3</sup>/s en septembre 81 et 1 315 m<sup>3</sup>/s en septembre 82) et le franchissement précoce en décrue des seuils de 600 m<sup>3</sup>/s et de 50 m<sup>3</sup>/s (ces derniers fixent la durée de l'invasion marine dans la basse vallée du fleuve, GAC *et al.*, 1985).

Le phénomène de la marée océanique qui introduit des oscillations cycliques du plan d'eau est nettement perceptible dès le début de novembre et il se prolonge bien au-delà du mois d'avril qui, en principe, marque la fin du cycle hydrologique. En 1981 comme en 1982, la forme sinusoïdale sur les enregistrements limnimétriques se maintient jusqu'en juillet.

Ce séjour prolongé des eaux marines dans la basse vallée du fleuve gêne considérablement l'évaluation quantitative des flux de matières particulaires et dissoutes d'origine continentale. Les données recueillies à St Louis ont été utilisées tant que l'eau reste douce à l'embouchure. Au fur et à mesure de la remontée de la langue salée, l'apport d'éléments dissous et de matières en suspension a été déterminé à partir des échantillonnages effectués à l'amont (Dagana, Podor et éventuellement Guédé, sur le Doué).

Tableau VI  
 Relevés limnimétriques journaliers (en cm) à Dagana (mai 1981 - avril 1982)  
 Daily height (cm) at Dagana (May 1981 - April 1982)

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril
1	-	68	72	120	253	271	115	82	65	49	50	29
2	48	70	77	125	255	271	106	85	62	43	39	27
3	60	82	82	130	256	270	98	76	57	37	44	33
4	69	84	89	129	255	267	94	66	62	34	45	39
5	60	82	94	127	257	264	91	57	55	56	45	41
6	71	82	94	133	259	260	90	54	56	62	50	51
7	66	77	86	141	260	255	89	58	53	65	59	57
8	58	69	88	164	260	247	89	66	60	65	61	68
9	47	69	70	170	261	241	95	72	62	66	70	79
10	55	54	68	174	262	236	102	75	-	69	65	72
11	32	56	69	179	263	232	103	76	65	68	64	68
12	42	54	78	186	267	228	113	86	66	59	65	-
13	50	55	87	192	268	220	118	92	58	35	63	68
14	57	60	95	201	270	212	109	72	52	45	65	64
15	54	71	102	205	270	200	108	64	49	39	60	51
16	54	78	104	211	271	198	95	61	40	35	53	43
17	74	81	106	216	273	193	104	63	41	36	49	44
18	68	83	116	218	274	183	86	60	43	42	41	49
19	67	82	100	222	275	173	90	61	40	44	36	49
20	69	76	104	226	274	163	73	58	32	49	37	49
21	67	75	103	228	273	152	74	39	33	50	51	51
22	67	72	105	229	274	144	78	36	34	52	54	53
23	62	69	108	231	274	138	84	46	32	64	59	54
24	62	65	103	233	274	136	85	52	33	66	62	57
25	61	68	94	235	274	132	85	62	41	61	71	60
26	57	60	95	236	275	132	85	63	49	59	75	56
27	52	57	98	242	274	131	85	61	58	58	71	52
28	50	55	100	244	274	125	82	63	68	51	67	44
29	51	60	104	246	274	121	81	68	66		65	35
30	60	71	106	247	273	121		68	61		61	32
31	65		106	250		117		69	55		53	

Tableau VII  
 Relevés limnimétriques journaliers (en cm) à Dagana (mai 1982 - avril 1983)  
 Daily height (cm) at Dagana (May 1982 - April 1983)

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril
1	29	49	65	91	191	172	103	74	59	56	62	60
2	29	51	64	97	196	172	108	76	51	56	62	60
3	30	53	71	101	201	171	107	75	50	55	61	54
4	37	54	74	106	206	167	111	63	43	54	59	45
5	38	60	73	103	211	164	100	43	37	55	58	45
6	56	64	75	104	214	159	92	39	29	45	52	34
7	51	67	76	100	218	156	89	41	26	43	43	30
8	51	73	80	101	220	153	84	36	32	44	40	40
9	50	75	86	103	223	150	78	34	35	45	38	41
10	47	77	86	98	221	145	82	34	42	45	33	51
11	38	76	83	93	224	139	80	41	45	54	33	51
12	46	69	64	86	222	134	80	43	48	49	42	60
13	48	68	61	86	220	130	82	51	52	49	-	60
14	42	65	59	85	220	134	86	65	56	49	67	74
15	35	64	60	87	219	134	94	54	60	50	69	72
16	32	67	60	103	219	138	97	43	61	53	69	70
17	32	65	59	112	219	141	94	46	57	52	71	63
18	32	73	65	123	219	142	92	47	50	57	65	59
19	46	75	88	135	217	139	81	50	50	49	59	55
20	53	77	84	148	217	140	75	47	50	45	57	44
21	57	81	95	157	217	139	70	49	35	45	56	36
22	65	88	106	158	215	126	67	50	42	39	55	37
23	79	92	110	156	212	116	64	52	43	38	53	-
24	80	90	108	162	208	108	60	50	45	42	52	51
25	81	87	95	159	204	99	59	45	46	46	51	64
26	78	79	98	158	199	91	64	40	46	54	47	69
27	71	75	97	159	194	87	65	41	46	60	55	70
28	69	74	94	164	189	90	62	45	45	61	52	71
29	54	73	83	172	182	92	67	52	49		59	64
30	49	68	87	179	176	93	73	57	50		61	51
31	48		91	186		101		57	59		59	

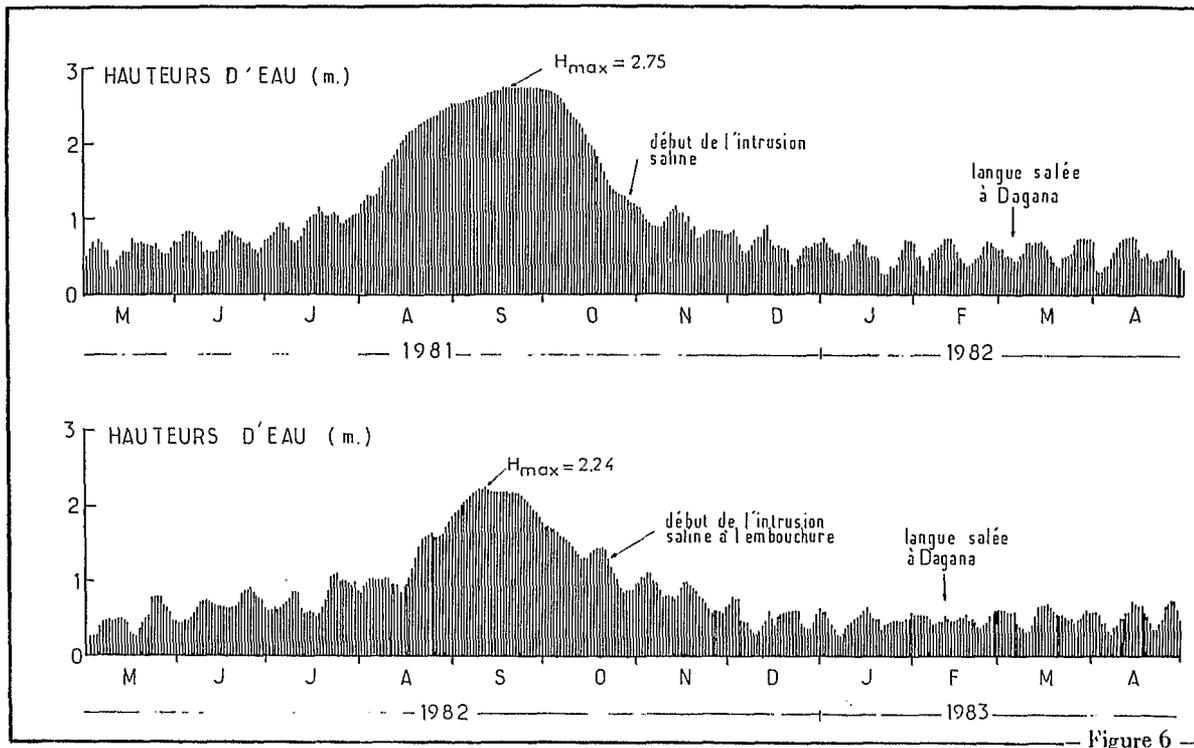


Figure 6

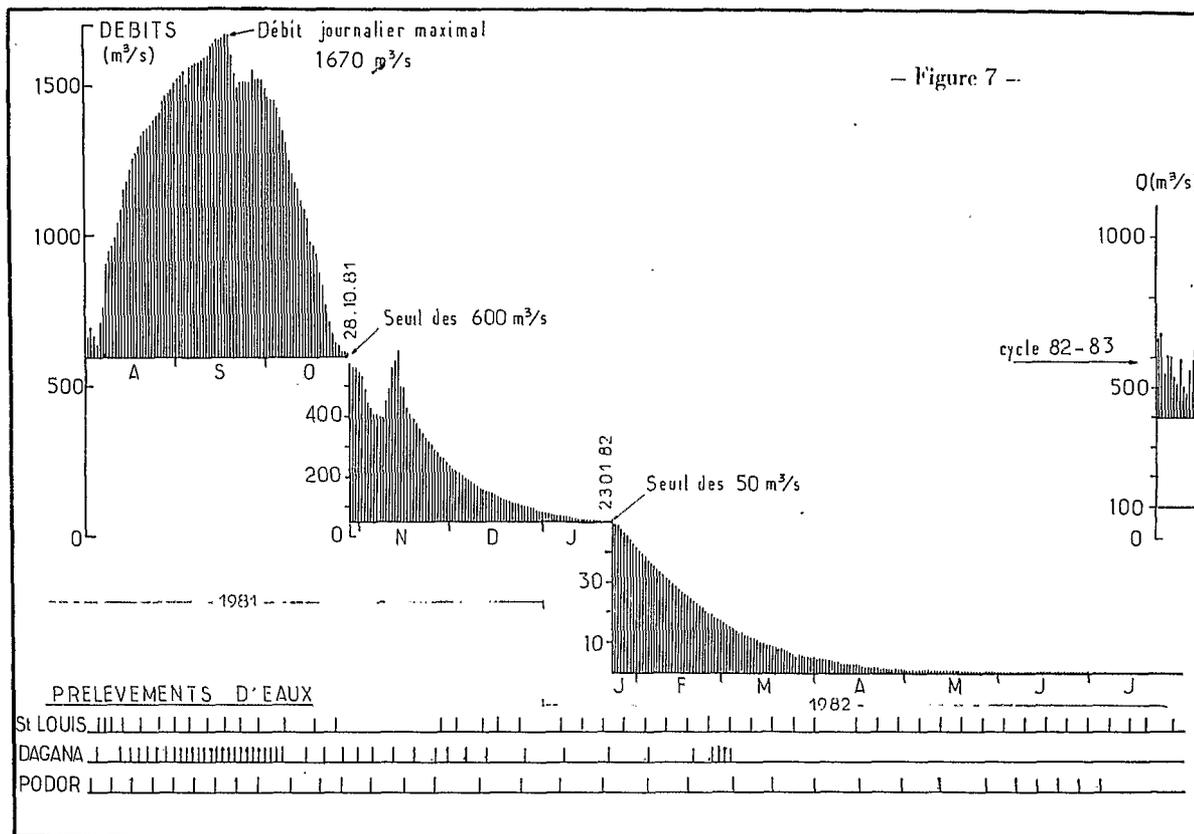


Figure 7

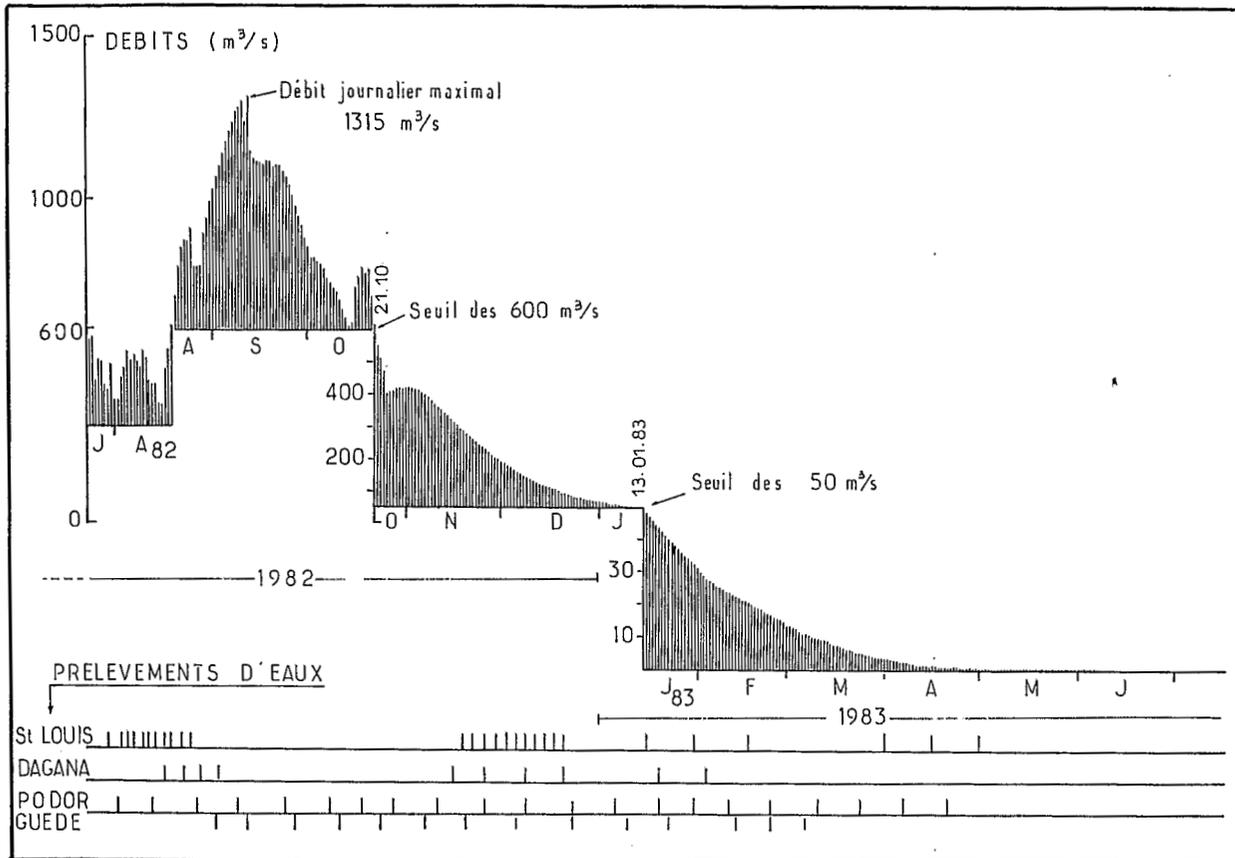


Fig. 8 — Débits journaliers à Dagana (cycle 1982-1983).  
Daily water discharge at Dagana (cycle 1982-1983).

Fig. 6 — Evolution du plan d'eau à Dagana (1981-1983). Evolution of daily height at Dagana (1981-1983).

Fig. 7 — Débits journaliers à Dagana (cycle 1981-1982). Daily water discharge at Dagana (cycle 1981-1982).

## II — LES APPORTS FLUVIAUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION A L'EMBOUCHURE DU SÉNÉGAL

### 1. Données antérieures

Il existe peu de données sur les débits solides du Sénégal. Les quelques mesures connues ne concernent que quelques stations (Kayes, Bakel, Dagana ...) et ont le plus souvent été limitées dans le temps (SEGUY, 1955 ; MANDIN, 1957 ; MICHEL, 1973).

SEGUY (1955) et MANDIN (1957) ont effectué des mesures de matières en suspension à Dagana-Bakel et Fadougou au cours de la décrue en 1953 et lors des crues fortes en 1955 et 1956. La charge moyenne des matières en suspension en début de crue a été évaluée à 250 mg/l à Dagana et à 170 mg/l à Bakel. A la pointe de crue, les deux stations ont donné des résultats sensiblement identiques, les concentrations oscillant entre 80 et 90 mg/l. La turbidité ne présentait aucune tendance systématique d'augmentation ou de diminution en fonction de la profondeur, phénomène caractéristique d'un transport de particules très fines.

Tableau VIII  
Débits journaliers ( $m^3/s$ ) à Dagana (mai 1981 à avril 1982)  
Daily discharge ( $m^3.s^{-1}$ ) at Dagana (May 1981 to April 1982)

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril
1	1.27	0.35		635	1525	1465	535	231	85.1	40.5	16.5	4.88
2	1.22	0.34		665	1540	1450	490	222	82.8	39.5	15.9	4.69
3	1.17	0.32		700	1545	1450	(444)	213	80.6	38.5	15.3	4.50
4	1.12	0.31		670	1500	1425	(425)	205	78.7	37.5	14.7	4.32
5	1.07	0.30		640	1555	1390	(410)	198	76.8	36.4	14.2	4.15
6	1.03	0.29		715	1565	1345	(405)	191	75.0	35.4	13.7	3.99
7	0.98	0.30		765	1575	1310	(400)	184	73.2	34.4	13.2	3.83
8	0.94	0.28		905	1575	1250	(400)	178	72.5	33.4	12.7	3.68
9	0.90	0.27		950	1580	1210	(450)	171	69.9	32.4	12.2	3.53
10	0.86			965	1590	1180	(495)	165	68.3	31.5	11.7	3.39
11	0.83			995	1595	1155	(565)	160	66.7	30.5	11.2	3.26
12	0.79		n.d.	1045	1625	1120	(585)	154	65.2	29.6	10.7	3.13
13	0.76			1085	1635	1090	(625)	149	63.6	28.6	10.3	3.01
14	0.73			1150	1650	1060	(500)	144	62.1	27.7	9.93	2.89
15	0.70			1175	1650	980	(500)	139	60.7	26.8	9.55	2.77
16	0.67			1220	1655	970	(430)	135	59.4	26.0	9.19	2.56
17	0.64			1255	1670	940	412	130	58.1	25.2	8.84	2.56
18	0.62			1270	1670	880	395	126	56.9	24.4	8.50	2.46
19	0.59	n.d.		1295	1600	835	379	122	55.6	23.6	8.17	2.36
20	0.57			1330	1540	775	364	119	54.5	22.8	7.85	2.26
21	0.55			1345	1490	720	349	115	53.3	22.1	7.54	2.17
22	0.53			1355	1510	680	334	112	52.1	21.3	7.23	2.08
23	0.51			1365	1510	645	321	109	50.1	20.6	6.95	1.99
24	0.49			1380	1510	640	307	105	49.7	19.9	6.68	1.92
25	0.47			1395	1510	620	295	103	48.6	19.2	6.41	1.84
26	0.45			1405	1550	620	283	100	47.4	18.5	6.16	1.77
27	0.43			1445	1520	615	271	97.1	46.3	17.8	5.93	1.70
28	0.41			1465	1520	580	261	94.6	45.1	17.2	5.70	1.63
29	0.40			1475	1520	565	250	92.2	44.0		5.47	1.56
30	0.38			1485	1490	565	240	89.8	42.8		5.26	1.50
31	0.37		(500)	1505		545		87.5	41.7		5.07	
Mois	0.70	(0.3)	(150)	1131	1566	970	404	143	60.8	27.9	9.76	2.88

Tableau IX  
Débits journaliers ( $m^3/s$ ) à Dagana (mai 1982 à avril 1983)  
Daily discharge ( $m^3.s^{-1}$ ) at Dagana (May 1982 to April 1983)

Jours	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avril	
1	1.44	0.56		380	1070	820	417	186	66.5	30.0	13.3	3.39	
2	1.38	0.57		450	1100	820	416	179	64.9	29.0	12.8	3.26	
3	1.33	0.58		480	1140	810	413	172	63.6	28.1	12.3	3.14	
4	1.28	0.58		530	1175	800	409	165	62.2	27.3	11.9	3.02	
5	1.23	0.58		500	1205	785	404	159	60.8	26.5	11.6	2.91	
6	1.18	0.59		520	1235	755	398	153	59.5	25.8	11.3	2.81	
7	1.14			500	1270	745	391	147	58.5	25.1	10.9	2.72	
8	1.10	n.d.	n.d.	480	1280	725	383	141	57.0	24.4	10.6	2.63	
9	1.06			530	1300	715	375	136	55.7	23.8	10.2	2.54	
10	1.03			510	1240	690	366	131	54.6	23.2	9.8	2.46	
11	0.99	0.59		440	1315	660	357	126	53.6	22.7	9.3	2.38	
12	0.96	0.56		430	1150	635	347	122	52.2	22.1	8.8	2.31	
13	0.93	0.58		430	1125	605	337	118	51.0	21.7	8.4	2.24	
14	0.90	0.57		370	1115	615	327	114	49.8	21.2	8.0	2.18	
15	0.88	0.56		365	1115	730	317	110	48.5	20.8	7.6	2.12	
16	0.86	0.55		480	1105	760	307	106	47.2	20.3	7.2	2.07	
17	0.83	0.53		535	1115	785	297	103	46.0	19.9	6.8	2.01	
18	0.81	0.52		605	1115	770	288	99.7	44.9	19.4	6.5	1.95	
19	0.79	0.49		700	1095	785	280	96.8	43.7	18.8	6.2	1.78	
20	0.78	0.48		790	1105	700	272	93.7	42.6	18.3	5.9	1.72	
21	0.76	0.45		850	1105	615	263	90.7	41.4	17.8	5.6	1.65	
22	0.74	0.42		870	1090	550	255	87.9	40.1	17.3	5.4	1.58	
23	0.72	0.39		565	870	1070	515	247	85.2	39.0	16.7	5.1	1.52
24	0.71	0.365		575	905	1045	470	239	82.7	37.9	16.2	4.9	1.46
25	0.66	(0.336)		440	790	1015	405	231	80.2	36.8	15.6	4.7	1.41
26	0.65	(0.309)		505	790	980	408	223	77.8	35.7	15.1	4.4	1.35
27	0.64	(0.284)		500	790	950	410	215	75.6	34.7	14.5	4.2	1.31
28	0.62	(0.26)		430	890	920	411	207	73.5	33.8	13.8	4.04	1.26
29	0.61	(0.24)		410	940	880	413	200	71.6	32.9	3.86	1.22	
30	0.59	(0.22)		490	990	855	415	193	69.7	31.9	3.69	1.18	
31	0.59			380	1035		417	68	31.0		3.53		
Mois	0.91	0.49	(156)	637	1109	637	313	114	47.7	21.3	7.7	2.12	

Ces premières mesures sur la charge solide des eaux du Sénégal et l'observation minutieuse du recul des berges ont conduit MICHEL (1967), SALL (1982), MICHEL et SALL (1984) à souligner l'importance du façonnement continu de la vallée par la crue annuelle dans l'apport de matériel fin à l'embouchure du fleuve. En effet, l'érosion latérale par le sapement des berges des rives concaves dans les méandres les plus importants serait de l'ordre de 1 à 1,50 m/an : les fractions grossières restent temporairement piégées aux pieds des rives convexes, les limons et les particules argileuses poursuivent avec le flot leur course vers l'aval. En reprenant les mesures de la M.A.S. (Mission d'Aménagement du Sénégal), à la station de Bakel, MICHEL (1973) a estimé l'apport détritique annuel à 2 800 000 tonnes (crue très forte), à 1 900 000 tonnes (crue moyenne) et à 1 000 000 tonnes (crue très faible).

Des contrôles plus précis à la turbisonde, avec un suivi quotidien de la charge solide à Kayes, ont été réalisés par une entreprise privée lors des crues de 1968 et de 1969. Bien que la ville de Kayes (5 km en amont du confluent avec la Kolombine) soit située à environ 900 km de St Louis, il nous a paru opportun, étant donné la rareté des mesures, de reprendre ici l'ensemble des résultats obtenus à cette station. Les deux campagnes de mesure de la turbidité en 1968 et en 1969 se sont déroulées du 2 juillet au 30 septembre. Le tableau X montre que les concentrations moyennes quotidiennes sont de l'ordre de 100 mg/l, avec des pointes pouvant atteindre 250 mg/l. Il ressort de l'examen des résultats que les turbidités sont toujours plus élevées en début de crue pour diminuer ensuite progressivement. En année moyenne, l'exportation de matériaux en suspension serait de l'ordre de 2,3 millions de tonnes (dont 300 000 tonnes de matière organique). Par extrapolation, on évalue à 1,4 et 2,9 millions de tonnes les flux détritiques annuels aux stations de Manantali et de Bakel.

Tableau X  
Turbidité des eaux du Sénégal à Kayes (mg/l)  
Concentration of suspended sediment of Senegal river at Kayes (mg/l)

Jours	1968			1969		
	Juil	Août	Sept	Juil	Août	Sept
1		145	60		130	105
2		155	110		127	95
3		155	115		125	95
4		180	90		102	95
5		135	55		90	200
6		160	40		107	160
7		175	60		80	165
8		150	90		65	185
9		190	70		55	190
10		165	55		65	150
11		140	240		65	95
12		80	235		62	107
13		75	250		70	135
14		120	175		70	85
15		135	160		65	90
16		115	165		70	100
17		110	135		65	95
18		68	135		55	100
19		72	100		85	105
20		105	70		90	100
21		63	75		135	65
22		92	55		115	65
23		120	55		115	30
24	130	120	60	140	90	50
25	125	105	55	150	160	45
26	240	90	35	100	172	40
27	140	40	35	82	145	50
28	135	85	30	82	147	45
29	180	100	25	95	150	40
30	130	95	20	88	105	40
31	160	115		100	105	

Rappelons enfin, pour mémoire, la récente étude entreprise par LÔ (1984) sur le fleuve Gambie qui, pour le cycle hydrologique très déficitaire de 1983-1984, évalue à 87 000 tonnes (turbidité moyenne de 46 mg/l) le bilan des exportations de matières à Goulombou.

## 2. Le protocole des prélèvements de matières en suspension

Le contrôle des flux détritiques d'origine continentale à l'embouchure du Sénégal a été entrepris au cours de la saison des hautes-eaux 1981-1982 et 1982-1983. Les prélèvements ont été effectués à St Louis au niveau du Pont Faidherbe, qui enjambe le bras principal du fleuve. Chaque échantillonnage consistait en une prise d'eau de 64 l à l'aide d'une bouteille à renversement de 1 l munie d'un messenger, les prélèvements successifs se faisant sur cinq profils transversaux et à différentes profondeurs.

Quelques déterminations de la turbidité ont cependant été réalisées selon la méthode préconisée par BILLON (1968). Elle consiste, lorsque jaugeage et prélèvement des matières en suspension sont effectués simultanément, à fixer un ajustage entre le moulinet et le saumon ; en surface, le tuyau est couplé à une pompe Japy et le récipient collecteur à une dame-jeanne.

Ainsi, 75 échantillons pour les matières en suspension ont été recueillis (27 en 1981-1982, 48 en 1982-1983). Le régime du cours d'eau a guidé la répartition et la densité du prélèvement au cours de la période des hautes-eaux (août-septembre et octobre) pour déterminer les principales caractéristiques du transport solide en suspension et évaluer les flux particuliers annuels.

## 3. Evolution saisonnière de la turbidité au cours des cycles hydrologiques 81-82 et 82-83

Les variations saisonnières de la turbidité des eaux du Sénégal sont très visibles et il est aisé d'en esquisser le schéma général. Pendant la saison des hautes-eaux, les eaux sont extrêmement turbides en raison de leur importante charge en limons ; leur couleur est alors « jaune sale ». Elles s'éclaircissent à partir d'octobre et deviennent « bleu sombre » dès le mois de décembre avec l'arrivée massive des eaux océaniques à la hauteur de St Louis. On retrouve ici le phénomène classique engendré par la présence de plaines d'inondation qui jouent le rôle de filtres et ne restituent au collecteur que des eaux limpides délestées de leur charge solide (GAC, 1979 ; GAC et TARDY, 1980).

Nous avons reporté dans le tableau XI l'ensemble des mesures sur la charge solide du fleuve Sénégal à St Louis. Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 686,4 mg/l (15/08/81) et de 415,8 mg/l (20/08/82). Ces valeurs sont bien plus élevées que celles connues antérieurement et sont vraisemblablement liées au fait qu'en période de sécheresse l'écoulement du fleuve canalisé dans le lit mineur pendant le passage de la première onde de crue provoque des sapements latéraux plus importants des rives. Comme ceci a été déjà souligné pour le Chari (CARRE, 1972 ; CHOURET, 1977), pour la Sanaga (NOUVELOT, 1972), pour le Bandama (LENOIR, 1972 ; MONNET, 1972) et pour la Gambie (LÔ, 1984), les turbidités maximales précèdent toujours la pointe de crue (fig. 9).

Les charges solides restent supérieures à 200 mg/l jusqu'à l'amorce de la décrue puis diminuent ensuite très rapidement. Dès novembre, avec l'achèvement de la saison des pluies, le développement de la végétation atténue le transport des matériaux en suspension ; la dégradation des sols est moindre et les eaux n'assurent plus que l'évacuation des fines particules déjà libérées. La période des basses-eaux est marquée par la restitution progressive au fleuve des eaux d'inondation du lit majeur, des eaux d'infiltration et la vidange des nappes. Les eaux deviennent limpides, acquièrent une charge dissoute plus importante ; les concentrations de matières en suspension diminuent fréquemment en dessous de 10 mg/l. Pour cette période qui s'étend en général de décembre à juillet, nous avons adopté pour la station de St Louis les concentrations mesurées successivement à Richard-Toll, Dagana ou Podor, délaissant l'une après l'autre ces stations de l'amont lorsqu'elles étaient touchées par la langue salée.

L'acquisition de la charge solide et les mécanismes qui, de l'amont vers l'aval des bassins versants, président, règlent et contrôlent les variations brutales des concentrations, restent mal connus. Les nombreuses études menées dans ce domaine ont montré que la charge en suspension est plus dépendante de la période de l'année que du débit. On a coutume de distinguer trois phases dans l'hydrogramme de crue :

- Une période d'érosion précoce qui se traduit par une augmentation rapide de la turbidité et du débit. Cette phase correspond à l'arrivée des matières en suspension apportées par le ruissellement superficiel dues aux premières averses sur les versants et aussi à la reprise des « laissés » de crue déposés par le clapotis sur une

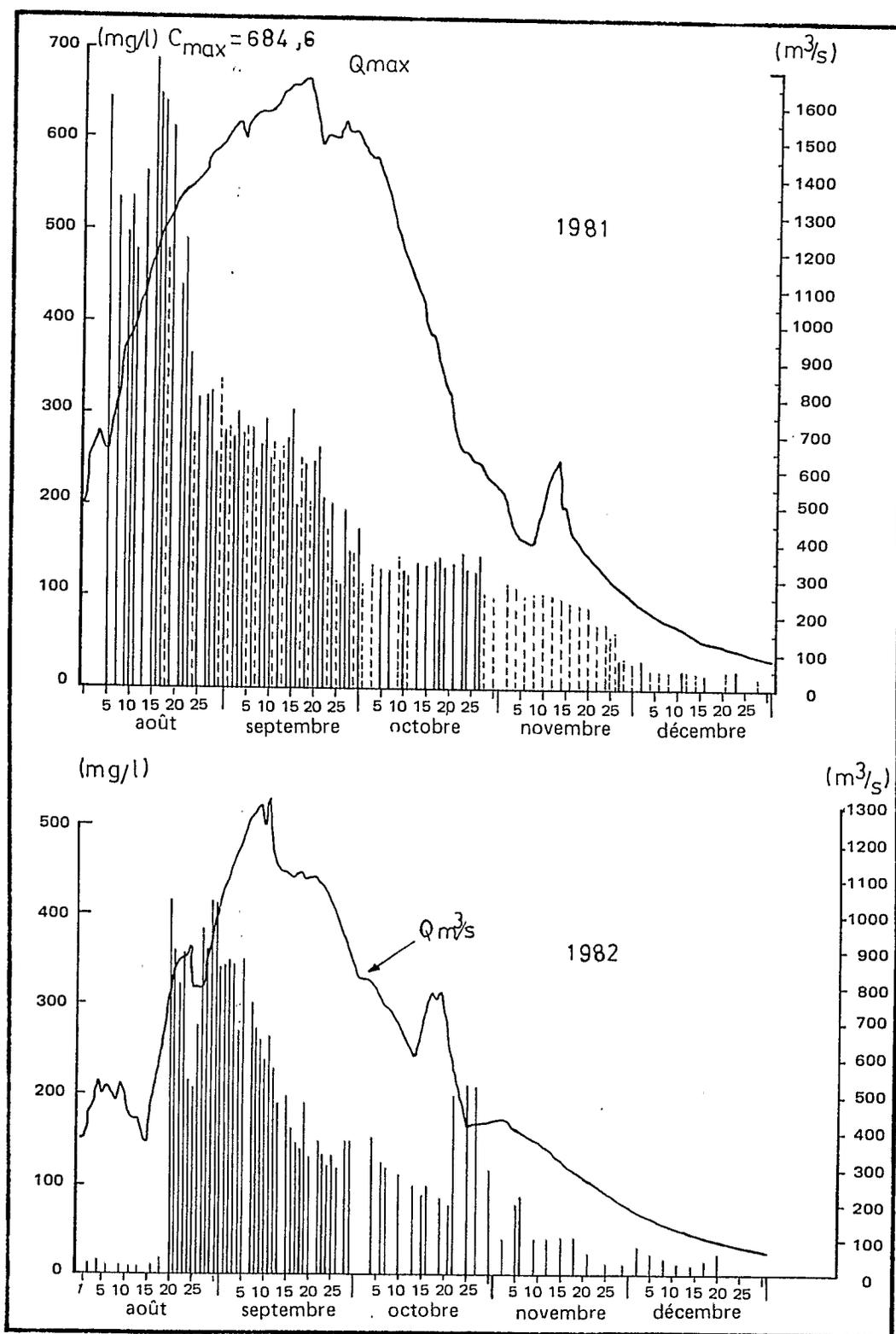


Fig. 9 — Variations de la charge solide (mg/l) en 1981 et 1982.  
 Variation of the concentrations of suspended sediments (mg/l) in 1981 and 1982.

Tableau XI  
 Charge solide (mg/l) des eaux du Sénégal à St Louis  
 Concentration of suspended sediment (mg/l) of Senegal river at St Louis

Date	C (mg/l)								
1979		1981		1981		1982		1982	
30/08	214.0	16/08	647.1	24/10	130.0	09/08	10.4	29/09	147.0
29/09	209.0	17/08	638.5	26/10	126.7	11/08	8.8	04/10	151.2
1980		19/08	611.8	27/10	140.7	13/08	7.7	06/10	124.7
22/08	205.2	21/08	439.7	27/11	34.3	16/08	10.0	07/10	119.5
25/08	554.1	22/08	490.8	02/12	28.6	18/08	18.4	10/10	113.4
02/09	358.8	23/08	366.0	11/12	21.3	10/08	415.8	13/10	99.4
08/09	188.4	25/08	316.2	16/12	17.4	21/08	356.8	15/10	89.5
15/09	318.1	27/08	319.7	23/12	19.7	22/08	320.0	16/10	99.1
22/09	289.7	28/08	324.5	1982		23/08	355.0	19/10	85.6
14/10	281.4	29/08	257.0	06/01	13.6	24/08	215.5	21/10	78.4
17/10	91.0	31/08	281.0	13/01	14.5	25/08	208.3	22/10	200.2
29/10	95.3	02/09	275.0	20/01	11.4	26/08	275.6	25/10	212.7
12/11	20.5	03/09	302.2	27/01	17.2	27/08	383.6	27/10	206.2
25/11	15.6	04/09	278.2	03/02	20.0	28/08	358.4	30/10	128.7
02/12	17.2	06/09	283.6	10/02	20.7	29/08	414.9	01/11	40.2
10/12	50.6	08/09	267.1	17/02	15.5	30/08	411.2	05/11	81.5
1981		09/09	295.7	24/02	21.9	31/08	339.2	09/11	88.9
06/01	< 10.0	10/09	249.3	03/03	10.1	01/09	343.8	12/11	40.2
13/01	< 10.0	12/09	246.0	10/03	5.3	02/09	347.5	15/11	38.8
20/01	< 10.0	14/09	273.6	17/03	30.4	03/09	343.7	18/11	41.5
27/01	< 10.0	15/09	303.8	24/03	21.9	04/09	269.0	21/11	21.9
23/06	29.8	16/09	199.8	31/03	8.4	05/09	350.1	25/11	9.9
25/06	32.1	18/09	243.1	14/04	22.2	07/09	299.6	29/11	11.2
30/06	29.2	20/09	248.6	21/04	16.6	08/09	271.9	02/12	28.2
03/07	26.0	21/09	263.4	28/04	30.0	09/09	260.3	05/12	20.4
06/07	38.6	22/09	208.6	05/05	28.4	10/09	238.6	08/12	15.8
09/07	35.1	24/09	201.6	12/05	34.8	11/09	262.3	14/12	12.0
12/07	28.3	26/09	113.5	19/05	24.6	12/09	226.3	14/12	10.4
15/07	29.5	27/09	195.8	26/05	50.3	13/09	190.3	17/12	15.5
18/07	10.3	28/09	150.3	02/06	36.1	15/09	197.6	20/12	24.6
21/07	6.8	30/09	174.4	09/06	37.2	16/09	161.8		
24/07	16.0	05/10	131.4	16/06	40.5	17/09	145.7		
27/07	15.9	07/10	130.4	23/06	57.3	18/09	137.7		
30/07	26.5	10/10	130.4	30/06	31.8	19/09	191.4		
05/08	644.9	13/10	136.4	07/07	58.3	20/09	129.3		
07/08	535.1	15/10	134.7	14/07	71.0	22/09	149.3		
09/08	498.1	17/10	139.0	19/07	52.1	23/09	134.1		
10/08	536.9	18/10	143.6	28/07	22.1	24/09	122.6		
11/08	480.5	19/10	133.2	02/08	11.5	25/09	133.2		
13/08	562.8	21/10	136.3	04/08	14.8	26/09	118.3		
15/08	686.4	23/10	147.0	06/08	10.4	28/09	147.0		

succession de petites banquettes dans la partie inférieure des berges : rappelons ici l'hypothèse émise par GAC (1979) sur la charge solide constante (1 g/l pour le Chari et 1,3 g/l pour le Sénégal du ruissellement superficiel).

- Une période d'érosion tardive où la charge en suspension diminue dans le cours d'eau alors que les débits augmentent. Cette phase de transition correspond à la fin de l'érosion des versants et surtout à l'érosion des berges et du lit mineur de la rivière. La charge solide initiale est diluée par une forte augmentation des débits liquides.
- Enfin une période d'alluvionnement, qui se traduit par une diminution simultanée de la turbidité et des écoulements. Au cours de cette phase, la rivière perd rapidement de sa compétence et les matériaux décantent en partie dans le lit mineur.

La phase 1 est en général de courte durée (de 20 à 30 jours) ; la seconde, de transition, se prolonge environ durant 2 mois, la phase terminale s'étendant jusqu'à la crue suivante. Schématiquement, l'extension de chacune des périodes serait de 1/12, 2/12 et 9/12 de l'année.

En réalité, les à-coups journaliers dans les concentrations semblent de plus en plus devoir correspondre à des sortes de pulsations en « patte d'oie » intimement liées aux fluctuations relatives des débits et au laps de temps écoulé depuis le début de la crue. Afin de mieux saisir l'intérêt de cette hypothèse de travail, nous avons reporté sur la figure 10 les valeurs moyennes des concentrations en fonction des débits moyens correspondants. En général, ce genre de courbe, que l'on trouve fréquemment dans la littérature, est établi à l'échelle mensuelle : ce

pas de temps a le désavantage de ne pas tenir compte de la précocité ou de l'arrivée tardive de la crue d'une part, et, d'autre part, il masque par sa durée les événements majeurs qui se situent à l'échelle hebdomadaire, voire même journalière. Le choix d'une échelle journalière paraît difficile, étant donné les nombreuses causes d'erreur aussi bien sur les débits que sur les concentrations. Aussi avons-nous adopté un pas de temps de 5 jours, qui nous paraît plus « raisonnable », et être un juste compromis. Les calculs ont été menés à partir des premiers écoulements enregistrés à St Louis (le 1er août en 1981-82, le 20 août en 1982-83).

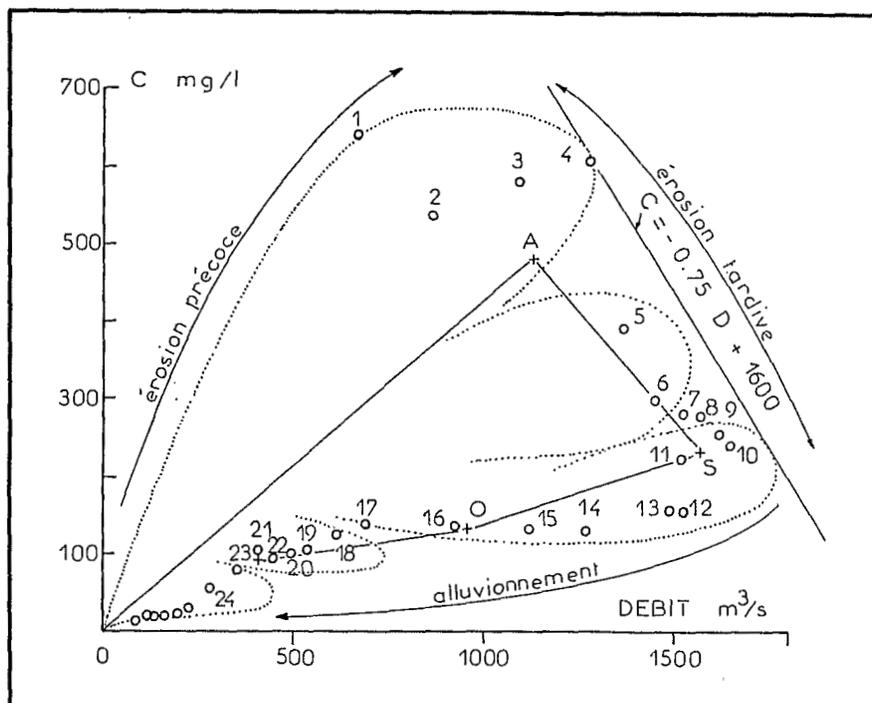


Fig. 10 — Relation entre charges solides et débits.  
Relation between concentration of suspended sediment and water discharge.

Les points représentatifs se disposent sur le pourtour d'empilements successifs (courbes en tiretés sur les figures). On en dénombre 5 pour le cycle hydrologique 81-82 et 4 pour le cycle 82-83. Ces courbes, assimilables à des sortes de « courbes-enveloppes », sont évidemment très approximatives, mais intuitivement nous pensons qu'elles schématisent assez bien les fluctuations de la charge solide avec les pulsations enregistrées dans les écoulements. La première courbe-enveloppe correspondrait à l'érosion précoce, la seconde et la troisième à l'érosion tardive, la quatrième et la cinquième à la phase d'alluvionnement. L'intervention des plaines d'inondation, qui se situerait dans le temps entre le troisième et le quatrième empilement, n'est pas perceptible ici (les déversements dans les plaines limitrophes ayant été très réduits au cours des deux crues). Il serait évidemment intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus à l'amont, à la station de Bakel.

Enfin, sans en connaître le sens réel, nous avons tracé la tangente aux trois courbes-enveloppes, caractéristiques semble-t-il de l'érosion, et déterminé son équation pour établir la relation entre concentrations et débits. Par tâtonnements successifs, on trouve :

$$C = -0,75 D + 1600$$

avec C : turbidité en mg/l, D : débit en m<sup>3</sup>/s (la droite de régression calculée pour les points 1 à 10 a pour équation  $C = -0,54 D + 1120$ ).

Pour un débit initial quasiment nul (ce qui revient à considérer les toutes premières étapes du ruissellement superficiel qui enclenchent l'érosion des versants), la valeur de la charge en suspension serait de 1600 mg/l ou 1,6 g/m<sup>3</sup>. Inversement, la charge en suspension s'annulerait dans les petits collecteurs de l'amont si, réunis, ils

débitaient plus de 2200 m<sup>3</sup>/s (cette éventualité, invraisemblable au premier abord mais que nous livrons à la réflexion du lecteur, suggère que le développement de la végétation serait tel qu'elle freinerait par une grande capacité d'interception toute érosion des sols).

#### 4. Le bilan de l'érosion mécanique. Flux mensuel et annuel des matières en suspension

Les flux détritiques particulières d'origine continentale à l'embouchure du Sénégal ont été calculés à partir des bilans journaliers lorsque les mesures de turbidité se faisaient quotidiennement (en général en crue) ou des bilans hebdomadaires lorsque les contrôles de la charge solide ont été réalisés à intervalles plus espacés (cas habituel en basses-eaux). La masse de sédiment est obtenue de manière classique par la formule :

$$M = C_s \cdot V \cdot 86\,400$$

$C_s$  : charge solide en mg/l ou g/m<sup>3</sup>,  $V$  : volume moyen journalier en m<sup>3</sup>/s.

Le tableau XII indique l'importance mensuelle et annuelle des flux de matières en suspension à l'embouchure du Sénégal. Les deux cycles hydrologiques donnent des résultats tout à fait différents avec des apports respectifs à l'océan de 2 850 000 tonnes en 1981-1982 et de seulement 1 185 000 tonnes en 1982-1983. Ces chiffres sont à rapprocher de ceux obtenus à la station amont de Bakel au cours des mêmes périodes : 2 340 000 tonnes (81-82) et 1 420 000 tonnes (82-83). L'afflux de matières en suspension a été deux fois plus important en 81-82 qu'en 82-83. Au cours du premier cycle étudié, la quantité de matériaux enregistrée à l'aval est plus importante que celle fournie par l'amont (globalement, le transit dans la vallée se solde par un gain de l'ordre de 500 000 tonnes) ; en revanche, au cours du second cycle, les quantités déversées dans l'océan ne représentent que 83 % des matériaux livrés par les hauts-bassins.

Tableau XII  
Bilan des flux particulières à l'embouchure du Sénégal  
Sediment load delivered to the sea by the Senegal river

Mois	1981 - 1982			1982 - 1983		
	C (mg/l)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Masse (en tonne)	C (mg/l)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Masse (en tonne)
Août	476.7	3028.95	1 443 995	186.2	1705.97	317 613
Septembre	237.5	4058.21	963 638	210.3	2875.39	604 644
Octobre	135.7	2598.48	352 731	128.1	1725.25	220 959
Novembre	89.2	1047.25	93 433	47.6	805.91	38 348
Décembre	19.7	383.72	7 561	(10.3)	305.34	(3 130)
Janvier	14.0	162.93	2 282	(7.4)	127.76	(945)
Février	17.0	67.50	1 146	(9.2)	51.53	(474)
Mars	15.0	26.15	391	(7.9)	20.62	(162)
Avril	5.7	7.47	42	(3.3)	5.50	(18)
Mai	5.9	2.45	15	(3.0)	2.01	(6)
Juin	11.1	1.26	11	(13.0)	0.31	(4)
Cycle hydrologique	251.7	11384.37	2 865 245	155.5	7625.59	1 185 903

A l'échelle mensuelle, les mois d'août, de septembre, d'octobre et de novembre rassemblent la quasi-totalité (99 %) de la charge solide. Ceci est d'ailleurs très visible sur les images satellites qui traduisent l'opacité de l'océan créée par le panache turbide des alluvions à l'embouchure. Plus de la moitié des flux annuels sont enregistrés en août pour le cycle 81-82 et en septembre pour le cycle 82-83. La turbidité moyenne annuelle s'est élevée à 252 mg/l en 1981-82 et à 156 mg/l en 1982-83, ce qui classe le Sénégal, selon la terminologie de PARDE, parmi les organismes fluviaux à fortes turbidités. La turbidité du Sénégal est bien plus importante que celle de son homologue gambien : à la station de Goulombou, située à la limite du bassin amont de la Gambie, les turbidités moyennes en 1974-1975 ont été de 78 g/m<sup>3</sup> (LERIQUE, 1975) et de 46 g/m<sup>3</sup> en 1983-84 (LÔ, 1984). Cet auteur souligne cependant le caractère exceptionnellement sec de ce dernier cycle hydrologique qui « n'est représentatif ni de l'écoulement, ni des transports réels de matières en suspension du fleuve Gambie ».

En admettant que l'ensemble du bassin versant du Sénégal réponde de façon homogène aux sollicitations des agents de l'érosion mécanique, la dégradation spécifique a été de l'ordre de 10,6 t/km<sup>2</sup>/an en 1981-82 et de 4,4 t/km<sup>2</sup>/an en 1982-83.

En définitive, le transport solide du fleuve Sénégal est relativement faible (en moyenne de l'ordre de 2 millions de tonnes par an). Il s'agit de matériaux fins qui, comme le souligne FRECAUT (1982), ont une double origine : « ils proviennent soit directement des plaines alluviales et des lits fluviaux (charge endogène), soit des versants sous l'action de l'érosion pluviale et du ruissellement superficiel (charge exogène) : la distinction entre les apports propres aux versants et à la plaine alluviale est cependant difficile ». GAC (1979), dans son étude sur les fleuves Chari et Logone, a proposé trois méthodes d'estimation de la contribution des plaines alluviales en s'appuyant sur les variations de la composition minéralogique des suspensions d'une part, et, d'autre part, sur le temps de propagation de la charge solide entre l'amont et l'aval des bassins versants. Ces résultats nous ont tout naturellement amené à préciser les caractères granulométriques, minéralogiques et chimiques des sédiments recueillis à St Louis pendant les deux campagnes de prélèvements.

### 5. Caractères granulométriques, minéralogiques et chimiques des matières en suspension

La faible variabilité de la nature des matières en suspension observée dans la plupart des cours d'eau de la zone sahélienne nous a amené, au terme de chaque campagne de prélèvements, à procéder à des regroupements afin de limiter les analyses à un nombre restreint d'échantillons (tabl. XIII). Les regroupements saisonniers (21 au total) ont été réalisés de manière à tenir compte de la chronologie des événements majeurs de l'érosion mécanique (maximum des concentrations, maximum des tonnages exportés et maximum des écoulements).

Tableau XIII  
Regroupement des échantillons de matières en suspension  
Samples of suspended sediment

Cycle 81-82			Cycle 82-83		
N°	Période	% tonnage	N°	Période	% tonnage
SLO 1 :	du 05 au 10/08/81.....	13,34 %	SLO 11 :	du 02 au 23/08/82.....	9,66 %
SLO 2 :	du 11 au 16/08/81.....	11,91 %	SLO 12 :	du 24 au 27/08/82.....	6,41 %
SLO 3 :	du 17 au 22/08/81.....	13,10 %	SLO 13 :	du 28 au 31/08/82.....	10,69 %
SLO 4 :	du 23 au 28/08/81.....	8,43 %	SLO 14 :	du 01/09 au 05/09/82.....	13,40 %
SLO 5 :	du 29/08 au 06/09/81.....	11,50 %	SLO 15 :	du 06/09 au 10/09/82.....	12,44 %
SLO 6 :	du 07 au 15/09/81.....	11,73 %	SLO 16 :	du 11/09 au 16/09/82.....	10,34 %
SLO 7 :	du 16 au 24/09/81.....	9,66 %	SLO 17 :	du 17/09 au 23/09/82.....	8,17 %
SLO 8 :	du 25/09/ au 07/10/81.....	8,63 %	SLO 18 :	du 24/09 au 19/10/82.....	18,36 %
SLO 9 :	du 08/10 au 18/10/81.....	4,80 %	SLO 19 :	du 20/10 au 31/10/82.....	6,89 %
SLO 10 :	du 19/10 au 01/08/82.....	6,90 %	SLO 20 :	du 01/11 au 06/11/82.....	1,11 %
			SLO 21 :	du 07/11 au 18/07/83.....	2,51 %

#### a) Caractères granulométriques

L'analyse granulométrique des matières en suspension a été réalisée à l'aide d'un sédi-graphe (« Sedi-graph 500 »). Cet appareil mesure automatiquement la vitesse de chute des sédiments (application de la loi de Stokes) grâce à un faisceau de rayons X et donne les résultats sous la forme de courbes de distribution en pourcentages cumulés en fonction des diamètres équivalents.

La fraction argileuse prédomine en toutes saisons (tabl. XIV) : elle représente de 65 à 93 % des matières en suspension. La fraction restante se partage entre les limons très fins (de 4 à 24 %), les limons fins (de 0,5 à 8 %), les limons moyens (de 0 à 5 %), les limons grossiers (de 0 à 3 %) et les sables (de 0 à 1 %). La distribution granulométrique moyenne des flux particuliers solides à l'embouchure du Sénégal est la suivante : 76 % d'argiles (< 2  $\mu\text{m}$ ) ; 14,2 % de limons très fins (de 2 à 5  $\mu\text{m}$ ) ; 5 % de limons fins (de 5 à 10  $\mu\text{m}$ ) ; 2,6 % de limons moyens (de 10 à 20  $\mu\text{m}$ ) ; 1,9 % de limons grossiers (de 20 à 50  $\mu\text{m}$ ) et 0,3 % de sables (fraction supérieure à 50  $\mu\text{m}$ ). Les courbes granulométriques cumulées indiquent que la fraction > 63  $\mu\text{m}$  est négligeable. Cette répartition est analogue à celles observées dans d'autres rivières africaines telles que le Chari (Tchad), le Bandama (Côte d'Ivoire), les rivières camerounaises, et la Gambie.

Tableau XIV  
Composition granulométrique des matières en suspension  
Particle size distribution of suspended sediment

N° échantillon	Date	Argiles < 2 $\mu$	Limons				Sables > 50 $\mu$
			2-5 $\mu$	5-10 $\mu$	10-20 $\mu$	20-50 $\mu$	
Crue 1981-82							
SLO 1	05/08 - 10/8/81	82.0	11.0	3.0	2.0	1.5	0.5
SLO 2	11/08 - 16/8/81	75.0	16.5	4.5	2.5	1.5	0
SLO 3	17 - 22/8/81	76.0	16.0	4.5	1.5	1.5	0.5
SLO 4	23 - 28/8/81	65.0	24.0	7.0	2.5	1.0	0.5
SLO 5	29/8 - 06/9/81	68.0	17.0	8.0	3.5	2.5	1.0
SLO 6	07/9 - 15/9/81	71.5	17.5	6.0	3.5	1.0	0.5
SLO 7	16/9 - 24/9/81	76.0	15.0	5.0	2.5	1.5	0
SLO 8	25/9 - 07/10/81	80.0	11.0	4.0	3.0	2.0	0
SLO 9	08/10 - 18/10/81	78.0	14.0	4.0	2.0	2.0	0
SLO 10	19/10 - 18/08/82	69.5	16.0	8.0	4.0	2.0	0.5
Crue 1982-83							
SLO 11	19/08 - 23/8/82	82.0	12.0	2.5	2.0	1.5	0
SLO 12	24/08 - 27/8/82	82.0	12.0	3.0	2.0	1.0	0
SLO 13	28/08 - 31/8/82	80.0	13.0	4.0	2.0	1.0	0
SLO 14	01/09 - 05/9/82	73.0	15.0	6.0	3.5	2.0	0.5
SLO 15	06/09 - 10/9/82	70.0	16.0	7.5	4.0	2.5	0
SLO 16	11/09 - 16/9/82	70.0	16.0	8.0	3.0	3.0	0
SLO 17	17/09 - 23/9/82	78.0	11.0	5.0	3.5	2.5	0
SLO 18	24/09 - 19/10/82	79.0	12.5	4.5	1.5	2.5	1.0
SLO 19	20/09 - 31/10/82	93.5	4.5	0.5	1.0	0	0
SLO 20	01/11 - 06/11/82	88.0	4.0	6.0	0	2.0	0
SLO 21	07/11 - 18/07/83	78.0	10.0	4.0	5.0	3.0	0
Moyenne							
1981-1982	-	74.2	15.7	5.3	2.7	1.6	0.5
1982-1983	-	77.8	12.7	4.7	2.5	2.1	0.2
Chari (GAC, 1979)	1970-1974	65.0	← 18.0 → ← 5 →				12
Bandama (MONNET, 1972)	1967-1970	62.0	← 25 → ← 13 →				
Cameroun (NOUVELOT, 1969)	1965-1968	82.0	← 7 → ← 11 →				
Gambie (LO, 1984)	1983-1984	64.0	22.0	7.0	← 7 →		

Les variations saisonnières restent peu marquées : on remarque simplement que la fraction fine argileuse est toujours plus faible au moment de la pointe de crue. Cette diminution est liée à l'accroissement de la vitesse du courant et sans doute au fait qu'à cette époque l'érosion des versants est relayée par celle des berges qui fournissent des matériaux plus grossiers. On sait en effet que dans le bassin inférieur le fleuve érode les sables fins et les limons des anciennes levées. L'ampleur de cette érosion latérale prend des proportions plus ou moins grandes selon l'importance des crues : dans les rives concaves, le recul des berges a pu être évalué à 0,80 m - 1,00 m par an (SALL, 1982). Pour le Chari, et en supposant que l'érosion affecte toute la hauteur de la berge, GAC (1979) cite le chiffre de 0,36 m/an.

### b) Composition minéralogique

Les analyses diffractométriques aux rayons X sur la fraction < 2  $\mu$ m et sur l'échantillon brut ont été réalisées au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface de Strasbourg.

L'identification des minéraux a été effectuée sur la base des critères définis par BROWN (1961), LUCAS (1962) et HOFFERT (1973).

#### Etude des échantillons bruts sur diagrammes de poudre

Les diffractogrammes de poudre obtenus sur les 21 échantillons sont sensiblement identiques. La figure 11 avec les diagrammes de SLO<sub>1</sub>, SLO<sub>5</sub>, SLO<sub>10</sub> (cycle 81-82), SLO<sub>13</sub> et SLO<sub>20</sub> (cycle 82-83) révèle la présence constante du quartz, de la kaolinite et d'argiles.

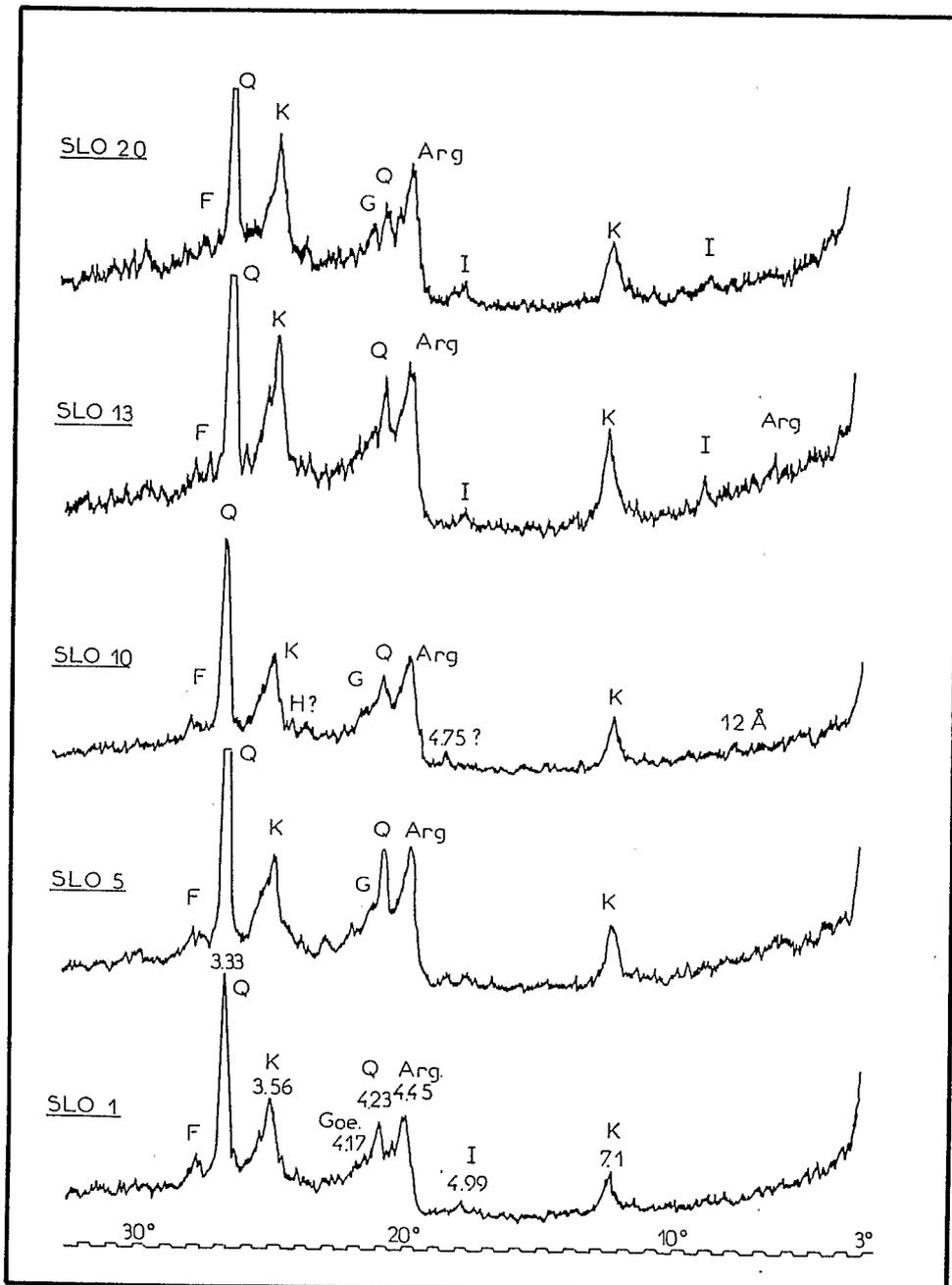


Fig. 11 — Diffractogrammes de poudre des matières en suspension (Q : quartz, Arg : argiles, F : feldspar, I : illite, G : goethite).  
X-Ray diffraction pattern on suspended load (Q : quartz, Arg : clays, F : feldspar, I : illite, G : goethite).

Ces trois espèces minérales sont prédominantes. Elles sont accompagnées d'illite, de feldspaths (caractérisés par les deux épaulements qui succèdent au pic principal du quartz) et de goethite. La présence d'hématite est probable en petites quantités.

L'analyse des échantillons bruts confirme les résultats granulométriques avec une fraction argileuse nettement dominante. Pour préciser le cortège minéralogique de cette fraction, les échantillons bruts ont d'abord été traités à l'eau oxygénée (élimination de la matière organique), puis remis en suspension dans l'eau : la technique de séparation de la phase argileuse à partir de cette suspension est basée sur la loi de Stokes.

### *Cortège argileux de la fraction fine des matières en suspension*

Il n'y a pas de différences fondamentales entre les deux séries d'échantillons : les quelques divergences observées ne tiennent qu'aux variations dans les proportions relatives des quatre types de minéraux phylliteux dominants : kaolinite, smectite, illite et interstratifiés.

- La kaolinite constitue, en toutes saisons, le minéral argileux prédominant dans les matières en suspension du Sénégal ; elle ne semble subir aucune transformation depuis son milieu d'origine jusqu'à l'estuaire ;
- La smectite est présente, et abondamment, dans tous les échantillons ; elle représente en moyenne 20 % de la charge solide, mais ce pourcentage est nettement moins élevé en périodes de crue. Son origine est vraisemblablement double (plaine alluviale et versants de l'amont), car elle est déjà très nettement perceptible dans les matières en suspension recueillies à Bakel ;
- L'illite est également présente dans tous les échantillons ; le taux varie peu au cours des saisons ;
- Les interstratifiés (types 10-14<sub>M</sub> et 14<sub>C</sub>-14<sub>M</sub>) sont très visibles sur les enregistrements « chauffés », le maintien de raies autour de 12 Å ne pouvant être attribué à aucun autre minéral phylliteux connu.

Les proportions relatives entre ces minéraux les plus abondants sont difficiles à préciser. En fixant arbitrairement à 100 la somme kaolinite/smectite/illite et interstratifiés, la kaolinite représenterait de 50 à 75 % de la fraction < 2 µm, la smectite de 15 à 35 %, les interstratifiés de 10 à 20 % et l'illite de 5 à 15 %. Cette évaluation sera reprise ultérieurement après l'étude de la composition chimique des matières en suspension.

### *c) Composition chimique des matières en suspension*

Les analyses chimiques des 10 échantillons regroupés de la crue 1981-1982 ont été réalisées au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface de Strasbourg à l'aide d'un spectromètre d'arc à lecture directe (majeurs et traces) et d'un spectromètre d'absorption atomique (dosage des alcalins).

L'ensemble des résultats figure dans le tableau XV. Les variations de composition d'un échantillon à l'autre sont très faibles, comme le laissait pressentir la similitude des caractères granulométriques et minéralogiques. Exprimées en % d'oxydes, les différentes analyses montrent que les matières en suspension sont essentiellement constituées de silice (50,2 %), d'alumine (24 %), de fer (9,7 %) ; un second groupe moins important réunit le potassium (1,7 %), le magnésium (1,2 %) et le titane (0,9 %). Deux éléments apparaissent en quantité négligeable : le calcium (0,3 %), le sodium (0,2 %). L'importance de l'eau de constitution (11,6 %) est liée à l'abondance des argiles. Parmi les éléments traces dont les teneurs sont aussi relativement stables au cours des saisons, on note par ordre d'abondance : le manganèse (Mn), le baryum (Ba), le chrome (Cr), le zirconium (Zr), le vanadium (V) et le nickel (Ni). Tous les autres constituants (Zn, Sr, Cu, Y, Mo et Co) ont des teneurs inférieures à 100 ppm. Cette composition chimique moyenne est tout à fait analogue à celle des matières en suspension qui, véhiculées par le Chari, accèdent au lac Tchad (GAC, 1979).

### *d) Evaluation de la distribution des différentes phases minérales à partir de la composition chimique des M.E.S.*

La reconstitution de la distribution des espèces minéralogiques peut être tentée à l'aide de la composition chimique des matières en suspension :

- En premier lieu, le dosage des fractions amorphes n'ayant pas été effectué, nous avons adopté les valeurs fournies par GAC (1979) pour le Chari à Ndjaména : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,4 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,7 %) et SiO<sub>2</sub> (0,4 %).
- On admet ensuite que tout le potassium présent sert à bâtir une illite du type de celle rencontrée dans les grès des Vosges par MOSSER *et al.* (1971) et dont la composition moyenne (établie à partir de 104 analyses) est la suivante : SiO<sub>2</sub> (56,2 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (25,2 %), K<sub>2</sub>O (8,17 %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,5 %), MgO (2,7 %), TiO<sub>2</sub> (0,68 %), CaO (0,50 %), Na<sub>2</sub>O (0,16 %), Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (0,09 %) et H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>, la perte à 1000 °C (5,82 %). Au niveau des éléments à l'état de traces, le baryum est l'élément dominant (ce qui explique son abondance dans les matières en suspension).

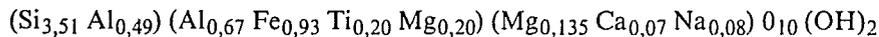
L'identification de smectites par les diagrammes de diffraction des rayons X impose ensuite de bâtir une argile gonflante. Nous avons admis que tout le magnésium restant après formation de l'illite entrerait dans le

Tableau XV

Composition chimique des matières en suspension (éléments majeurs en % d'oxydes, éléments traces en ppm)  
Chemical composition of suspended solids (in percent oxid for major elements, in ppm for trace elements)

Echantillons	SLO <sub>1</sub>	SLO <sub>2</sub>	SLO <sub>3</sub>	SLO <sub>4</sub>	SLO <sub>5</sub>	SLO <sub>6</sub>	SLO <sub>7</sub>	SLO <sub>8</sub>	SLO <sub>9</sub>	SLO <sub>10</sub>	Moyenne
Perte à 110° C	5.42	5.17	4.86	5.09	4.65	5.10	5.07	5.08	5.35	5.23	-
<b>Eléments Majeurs</b>											
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	11.64	11.75	11.20	11.71	11.44	11.37	11.31	11.64	12.08	11.96	11.57
SiO <sub>2</sub>	49.31	49.63	51.17	49.61	50.91	50.98	50.64	50.64	48.77	48.80	50.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.14	23.93	23.80	24.65	23.97	23.51	24.02	23.17	24.84	25.05	24.02
MgO	1.59	1.37	1.16	1.04	1.04	1.13	1.19	1.17	1.14	1.14	1.22
CaO	0.34	0.31	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.51	0.20	0.20	0.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.66	9.95	9.50	9.88	9.49	9.83	9.51	9.84	10.16	9.92	9.74
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
TiO <sub>2</sub>	0.97	0.92	0.96	0.93	0.93	0.90	0.93	0.93	0.82	0.83	0.92
Na <sub>2</sub> O	0.21	0.20	0.20	0.17	0.20	0.20	0.20	0.19	0.16	0.26	0.20
K <sub>2</sub> O	1.96	1.75	1.60	1.64	1.65	1.70	1.73	1.73	1.68	1.67	1.72
Somme	99.87	99.86	99.84	99.86	99.87	99.86	99.87	99.87	99.88	99.87	99.87
<b>Eléments Traces</b>											
Sr	67.2	62.8	55.4	47.0	52.9	53.7	55.5	53.1	54.7	51.6	55.4
Ba	423.0	379.0	378.0	319.0	312.0	331.0	331.0	314.0	277.0	298.0	336.2
V	157.0	186.0	179.0	182.0	166.0	168.0	177.0	173.0	169.0	167.0	172.4
Ni	104.0	114.0	108.0	103.0	110.0	113.0	110.0	110.0	101.0	99.0	107.2
Co	19.0	20.2	15.4	12.3	16.4	16.1	17.3	18.8	17.8	14.5	16.8
Cr	204.0	228.0	244.0	234.0	222.0	219.0	212.0	213.0	214.0	219.0	220.9
Zn	94.1	96.7	85.1	89.7	80.9	90.5	85.8	83.5	89.1	87.9	88.3
Cu	51.0	55.4	55.4	51.9	52.1	51.2	49.1	47.8	49.9	47.4	51.1
Sc	26.5	27.5	26.7	28.3	27.5	25.6	24.8	25.8	25.7	26.8	26.5
Y	33.5	32.9	32.7	32.8	32.3	31.3	31.4	31.5	27.6	27.7	31.4
Zr	178.0	171.0	186.0	193.0	179.0	184.0	179.0	190.0	159.0	178.0	178.8
Mo	16.0	10.0	25.0	13.0	13.0	31.0	45.0	22.0	19.0	20.0	21.4
Somme	1373.3	1383.5	1390.7	1306.0	1264.1	1314.4	1317.9	1282.5	1194.8	1236.9	1306.4
%	0.137	0.138	0.139	0.131	0.126	0.131	0.132	0.128	0.119	0.124	0.131
Total	100.007	99.998	99.979	99.991	99.996	99.991	100.002	99.998	99.999	99.994	100.001

réseau d'une montmorillonite dont la formule structurale est une moyenne entre celles proposées par CARMOUZE (1976) et GAC (1979) pour les matières en suspension du Chari :



Après déduction des fractions d'oxydes liées dans cette argile au magnésium restant, les éventuelles quantités de sodium et de calcium non utilisées sont incorporées dans les plagioclases et on attribue le fer restant à la goethite. L'excédent d'alumine sert ensuite à calculer le taux de kaolinite et, si toute la silice n'a pas été utilisée, on considère que le % restant représente le taux de quartz dans l'échantillon.

Dans toute la série de St Louis (SLO<sub>1</sub> à SLO<sub>10</sub>), un résidu d'oxydes de 3 à 5 % demeure inexplicé. Il a arbitrairement été considéré comme représentant le % d'interstratifiés. Ces résultats doivent donc être interprétés en tenant compte des réserves émises (la non-prise en compte par exemple des feldspaths potassiques visibles sur les diagrammes de poudre incite à la prudence).

Le bilan minéralogique chiffré établi pour la crue 1981-82 est donné dans le tableau XVI. Les pourcentages d'illite et d'interstratifiés sont constants (20 % pour l'illite et 4 % pour les interstratifiés). La proportion de smectites est très variable (de 14 à 28 %) : elles sont très abondantes dans les premiers flots, ce qui suggère leur origine lointaine depuis les provinces distributrices de l'amont. La kaolinite est le minéral argileux prépondérant ; à l'exception de SLO<sub>1</sub>, les pourcentages varient peu autour de 40 %. La fraction de quartz est faible en début de crue et en décrue ; elle est maximale lors de la pointe de crue, c'est-à-dire lorsque les vitesses du courant sont les plus fortes. Avec la réserve émise concernant les feldspaths potassiques, les feldspaths sodiques et calciques ne sont présents qu'en quantités négligeables. Les pourcentages d'hydroxydes de fer varient peu autour de 3,50 %.

La comparaison de cette reconstitution minéralogique avec les dépouillements granulométriques montre que pour tous les échantillons la somme kaolinite/smectite/illite/interstratifiés est toujours supérieure à la

Tableau XVI  
 Composition minéralogique des matières en suspension du fleuve Sénégal à St Louis.  
 La fraction amorphe considérée comme constante et égale à 3,5 % n'a pas été reportée  
 Mineralogical composition (%) of suspended materials.  
 The amorphous fraction is not indicated (constant value : 3,5 %)

Minéral N° échant.	Kaolinite (K)	Smectite (Sm)	Illite (I)	Interst. (Int)	Quartz (Q)	Plagioclasen		Goethite (Goe)
						Albite	Anorthite	
						(Ab)	(An)	
SLO <sub>1</sub>	33.20	28.65	21.69	4.15	5.31	0	0	3.50
SLO <sub>2</sub>	38.16	25.22	19.41	4.04	7.60	0	0	2.07
SLO <sub>3</sub>	38.37	18.19	19.28	4.00	12.59	1.08	0	2.99
SLO <sub>4</sub>	42.39	14.79	19.43	3.93	10.90	1.09	0	3.97
SLO <sub>5</sub>	40.36	15.37	20.07	4.03	12.46	0.67	0	3.54
SLO <sub>6</sub>	39.65	16.81	21.51	4.12	10.10	0.59	0	3.72
SLO <sub>7</sub>	38.93	18.98	19.87	3.90	11.27	0.49	0.09	2.97
SLO <sub>8</sub>	36.17	18.89	20.66	4.41	11.75	0.42	1.09	3.11
SLO <sub>9</sub>	41.24	17.40	20.64	4.41	8.76	0.28	0	3.77
SLO <sub>10</sub>	41.64	17.52	20.01	4.11	8.65	1.07	0	3.50
Moyenne (Sénégal)	38.60	19.70	20.32	4.08	9.90	0.60	0.10	3.20
Chari (GAC, 1979)								
Amont	58.8	traces	← 18.5 →		13.48	← 0.34 →		5.20
Aval	48.5	10.5	← 17.5 →		11.70	← 5.20 →		3.10

fraction  $< 2 \mu\text{m}$ . Ce résultat suggère qu'un pourcentage non négligeable (de 1 à 15 %) de la phase dite « argileuse » se situe dans les limons très fins dont la taille est comprise entre 2 et  $5 \mu\text{m}$ .

## 6. Les flux particuliers quantitatifs et qualitatifs à l'embouchure du Sénégal

Avant de présenter le bilan quantitatif et qualitatif des flux de particules solides à l'embouchure du Sénégal, deux aspects de cette décharge annuelle de « troubles » vers l'océan méritent d'être évoqués : le charriage de fond et la matière organique.

Le charriage de fond des matériaux grossiers qui se déplacent par roulage et saltation épisodique dans le lit du fleuve n'a pas été étudié. Mal connu et peu important dans le domaine tropical, il demeure un phénomène limité dans le delta du Sénégal. MICHEL (1967) a souligné sur le Doué le déplacement annuel d'un lambeau d'une basse terrasse sur moins de 500 m. A la hauteur de Kayes, le charriage de fond mobilise de l'ordre de 100 000 tonnes de matériaux grossiers, ce qui représente moins de 5 % de la charge solide annuelle en suspension. Ces résultats confirment les observations de CARRE (1972) qui mentionne leurs faibles contributions (de 5 à 10 %) aux flux détritiques, de POLIAKOV (1938) pour la Volga (3 %), de SPRONCK (1941) pour le Congo (7 %), de GIBBS (1967) pour l'Amazonie (de 2 à 10 %) et de MATHIEU (1972) pour le Bandama (de 5 à 10 %). Dans le cas du Sénégal, ce charriage de fond concerne essentiellement le quartz (de 75 à 95 %) et les minéraux lourds tels que l'andalousite, la hornblende et l'épidote.

Le dosage de la matière organique a été réalisé sur les groupements d'échantillons des deux crues (21 analyses). Le taux de matière organique dans les matières en suspension du Sénégal est faible (de 1,2 à 2,4 % sur l'ensemble des deux cycles) et bien inférieur, en tous cas, aux pourcentages relevés sur la Gambie : LÔ (1984) y fait état de plus de 10 % de matière organique à Goulombou. Au cours des cycles 1981-82 et 1982-83, on évalue à environ 45 000 tonnes et 23 000 tonnes « l'expulsion » annuelle de matière organique à l'embouchure du Sénégal, ce qui représente 1,56 % et 1,93 % des quantités de matières en suspension. Les tonnages respectifs de matière inorganique s'établissent alors à 2 820 565 tonnes (en 81-82) et à 1 163 067 tonnes (en 82-83), et les bilans granulométrique, minéralogique et chimique sont les suivants :

BILAN GRANULOMÉTRIQUE	1981 - 1982	1982 - 1983
$< 2 \mu\text{m}$ (argiles)	2 092 860 tonnes	904 870 tonnes
2 - $5 \mu\text{m}$ (limons très fins)	442 830	147 710
5 - $10 \mu\text{m}$ (limons fins)	149 490	54 660

10 - 20 $\mu\text{m}$ (limons moyens)	76 155 tonnes	29 080 tonnes
20 - 50 $\mu\text{m}$ (limons grossiers)	41 530	24 420
> 50 $\mu\text{m}$ (sables fins)	14 100	2 327
	<hr/> 2 820 565	<hr/> 1 163 067

**BILAN MINÉRALOGIQUE (1981 - 1982)**

matière organique		44 680 tonnes
matière inorganique :		1 088 735
kaolinite		555 650
smectite		573 140
illite		279 240
quartz		115 080
interstratifiés		98 720
amorphes		90 260
goethite		16 920
albite		2 820
plagioclases ] feldspaths		<hr/> 2 820 565

**BILAN DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES (1981 - 1982)**

<i>Eléments majeurs</i>		<i>Eléments traces</i>	
Si	661 900 tonnes/an	Ba	950 tonnes/an
Al	358 700	Mn	810
Fe	192 300	Cr	660
K	40 300	Zr	500
Mg	20 800	V	490
Ti	15 700	Ni	300
Ca	5 000	Zn	250
Na	4 200	Sr	160
		Cu	140
		Co et Mo	60

A l'heure actuelle, l'érosion mécanique dans le bassin versant du Sénégal, considéré dans son ensemble, draine essentiellement vers l'embouchure du fleuve des particules très fines ( $< 2 \mu\text{m}$ ) constituées de kaolinite, de smectites et d'illite. En termes de bilan chiffré, les flux particuliers soutirés au domaine continental et déversés dans l'océan sont surtout formés de silicium, d'aluminium et de fer, à un degré moindre de matière organique, de potassium, de magnésium et de titane. Le calcium et le sodium sont peu abondants dans les matières en suspension, ces deux éléments empruntant de préférence la voie soluble pour rejoindre le domaine marin.

**CONCLUSION**

Le bassin du Sénégal, d'une superficie de 280 000  $\text{km}^2$ , alimenté à partir des régimes « tropical de transition » et « tropical pur », s'étend profondément en domaine sahélien avant d'atteindre l'océan Atlantique.

Parmi tous les fleuves sahéliens, le Sénégal est celui qui dispose de la plus longue série d'observations limnimétriques : l'information sur les écoulements est complète depuis 1903. Pour la période 1903 - 1983, le module moyen interannuel s'élève à 715  $\text{m}^3/\text{s}$  à Bakel et à 641  $\text{m}^3/\text{s}$  à Dagana. L'irrégularité des écoulements constitue l'une des caractéristiques du Sénégal : à l'exutoire amont de Bakel les débits ont varié dans un rapport de 1 à 5,7 (1247  $\text{m}^3/\text{s}$  en 1924 et 220  $\text{m}^3/\text{s}$  en 1983) et de 1 à 4,3 dans le bief aval de Dagana (969  $\text{m}^3/\text{s}$  en 1924 et 226  $\text{m}^3/\text{s}$  en 1983).

La sévérité de la sécheresse actuelle (sans interruption depuis 1968) se traduit à l'amont comme à l'aval du bassin par un déficit de près de 40 % dans les écoulements du bassin et par l'absence de phénomène d'inondation vers les dépressions situées en bordure du réseau hydrographique. L'effet de cumul de cette succession d'années à faible écoulement se marque par un tarissement et une phase d'épuisement précoces, une recharge insuffisante des nappes phréatiques et des étiages très prononcés au cours de la saison des basses-eaux (des valeurs nulles ont été observées en 1982 et en 1984). Les cycles hydrologiques 1981-1982 et 1982-1983 qui ont servi de base à notre

étude se sont traduits par des modules respectifs de 374 m<sup>3</sup>/s et de 254 m<sup>3</sup>/s, ce qui les situe parmi les dix années à plus faible écoulement depuis 81 ans. Cette situation a engendré une remontée précoce des eaux océaniques dans la basse vallée du fleuve. Il en est résulté un temps de séjour prolongé des eaux marines vers l'amont du fleuve qui a considérablement gêné l'évaluation quantitative et qualitative des flux continentaux de matières particulaires et dissoutes à l'embouchure.

A la saison des hautes-eaux, les eaux du fleuve sont fortement chargées en limons. Les plus fortes concentrations journalières observées au cours des deux cycles successifs ont été de 685 mg/l et de 416 mg/l. Ces valeurs, bien plus élevées que celles enregistrées antérieurement, sont vraisemblablement liées au fait qu'en période de sécheresse la contribution des berges aux flux détritiques issue de l'amont n'est pas « contrebalancée » ou « équilibrée » par une sédimentation dans les plaines d'inondation. Une autre hypothèse peut aussi être avancée : après une longue succession d'années sèches, l'abaissement des nappes phréatiques est d'une telle ampleur que leur recharge nécessite une « ponction » non négligeable des écoulements. Cette fuite latérale d'eau limpide a pour corollaire une augmentation de la charge solide par unité de volume dans le lit mineur. Autrement dit, sur la « toile de fond » que constitue la charge solide acquise par l'érosion des sols de l'amont, deux mécanismes concurrentiels interviennent au cours du transit dans la vallée : la réalimentation des nappes qui a pour conséquence d'accroître la turbidité et les débordements vers les plaines d'inondation qui la réduisent.

Les charges solides restent supérieures à 200 mg/l jusqu'à l'amorce de la décrue. Dès novembre, le développement de la végétation atténue le transport des matériaux en suspension ; la dégradation des sols est moindre et les eaux n'assurent plus que l'évacuation de fines particules déjà libérées. Pendant la période des basses-eaux, les concentrations de matières en suspension se stabilisent autour d'une valeur moyenne de 10 mg/l. Trois phases ont été mises en évidence dans l'hydrogramme de crue :

- une phase d'érosion précoce qui se traduit par une augmentation rapide de la turbidité et des débits ;
- une phase d'érosion tardive, caractérisée par une diminution de la charge solide et une croissance continue des débits jusqu'à la pointe de crue ;
- une phase d'alluvionnement, marquée par une baisse simultanée de la turbidité et des écoulements. Cette dernière phase pouvant elle-même se décomposer en deux périodes suivant l'importance du phénomène d'inondation.

Le bilan de l'érosion mécanique donne des résultats tout à fait différents sur les deux cycles hydrologiques avec des apports à l'océan de 2 850 000 tonnes en 1981-1982 et 1 185 000 tonnes en 1982-1983. La turbidité moyenne s'élève à 252 mg/l en 1981-1982 et à 196 mg/l en 1982-1983. Les dégradations spécifiques ont été respectivement de 10,6 et de 4,4 t/km<sup>2</sup>/an.

La distribution granulométrique moyenne des flux particulaires solides à l'embouchure du Sénégal montre la prépondérance des minéraux argileux (76 %) devant la fraction limoneuse (23,5 %) et surtout sableuse présente en quantité négligeable (0,5 %). La composition minéralogique de la fraction fine des matières en suspension révèle la présence dominante, en toutes saisons, de la kaolinite (de 50 à 75 %) et l'abondance des smectites (de 15 à 30 %), des interstratifiés (de 10 à 20 %) et de l'illite (de 5 à 15 %). Les matières en suspension sont essentiellement constituées de silice (50 %), d'alumine (24 %) et de fer (10 %) ; le potassium (1,7 %) et le magnésium (1,2 %) sont relativement abondants en comparaison des quantités négligeables de calcium (0,3 %) et du sodium (0,2 %). Parmi les éléments à l'état de traces, Mn, Ba, Cr, Zr, V et Ni ont des teneurs supérieures à 100 ppm. L'importance de l'eau de constitution (12 %) est liée à l'abondance des argiles.

Au cours des cycles 1981-1982 et 1982-1983, le fleuve Sénégal a respectivement « livré » à l'océan 45 000 et 23 000 tonnes de matière organique. Cette « expulsion annuelle » ne représente que 1,6 % et 1,9 % des flux totaux de particules solides qui transitent à l'embouchure du fleuve.

*Manuscrit déposé le 9 juillet 1985, accepté le 24 décembre 1985*

## BIBLIOGRAPHIE

- BILLON B. (1968) — Mise au point des mesures de débits solides en suspension (Tchad). *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, V, 2, p. 3 - 14.
- BROWN G. (1961) — The X-ray identification and crystal structures of clay minerals. Miner. Soc. London, 544 p.
- CARMOUZE J.P. (1976) — La régulation hydrogéochemique du lac Tchad. Contribution à l'analyse biodynamique d'un système endoréique en milieu continental. *Trav. et Doc. ORSTOM*, 58, 418 p.
- CARRE P. (1972) — Quelques aspects du régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, IX, 1, p. 19 - 45.
- CHOURET A. (1977) — Régime des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad. Synthèse des études de l'ORSTOM en République du Tchad. *Ann. Géogr.*, p. 126 - 133.
- FAURE H. et GAC J.Y. (1981) — Will the sahelian drought end in 1985 ? *Nature*, 291, p. 475 - 478.
- FRECAUT R. (1982) — Eléments d'hydrologie et de dynamique fluviales. I. Hydrologie et dynamique fluviales des régions chaudes et humides des basses latitudes. Ed. Univ. Nancy II, 147 p.
- GAC J.Y. (1979) — Géochemie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Thèse Sci., Univ. Strasbourg et *Trav. et Doc. ORSTOM*, 123, (1980), 251 p.
- GAC J.Y. et TARDY Y. (1980) — Géochemie d'un paysage tropical : le bassin du lac Tchad. In : « Interactions entre les eaux, les minéraux et les roches », Y. TARDY (éd.), Eléments, Tarbes, p. 199 - 239.
- GAC J.Y., KANE A., SAOS J.L., CARNM. et VILLENEUVE J.E. (1985) — L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. *Rev. Hydrobiologie Tropicale, ORSTOM*, (à paraître).
- GIBBS R.J. (1967) — The geochemistry of the Amazon river system. I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 78, 10, p. 1203 - 1232.
- GUIGUEN N. et LERIQUE J. (1977) — Note sur l'étalonnage du Sénégal à Bakel à la suite des campagnes de mesures de 1974 à 1975. *Rapp. ORSTOM*, Dakar, 38 p.
- HOFFERT M. (1973) — Les minéraux argileux dans quatre carottes de l'Atlantique Nord. Essai d'interprétation sédimentologique. Thèse 3e cycle, Univ. Strasbourg, 53 p.
- LENOIR F. (1972) — Exportation chimique d'un bassin intertropical (le Bandama en Côte d'Ivoire). Influence des conditions hydrologiques. Thèse Sci., Univ. Nice, 402 p.
- LERIQUE J. (1975) — Les transports solides en suspension dans la Gambie à Kédougou et à Goulombou : résultats de la campagne 1974. *Rapp. ORSTOM*, Dakar, 11 p.
- LÔ H.M. (1984) — Le bassin de la Gambie en amont de Goulombou : contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en domaine tropical humide africain (République de Guinée et du Sénégal). Thèse 3e cycle, Univ. Nancy II, 396 p.
- LUCAS J. (1962) — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etude sur les argiles du Trias. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 22, 202 p.
- MANDIN R. (1957) — Rapport sur les mesures de débits solides à Dagana-Bakel Fadougou. *Bull. Mission Aménag. Fleuve Sénégal (M.A.S.)*, 44, 60 p.
- MATHIEU P. (1972) — Apports chimiques par les précipitations en savane et sous forêt. Influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides, Bassin de l'Amitioro (Côte d'Ivoire). Thèse Sci., Univ. Nice, 441 p.
- MICHEL P. (1967) — Les dépôts du Quaternaire récent dans la basse vallée du Sénégal. *Bull. Inst. fond. Afr. Noire*, A, 29, 2, p. 853 - 860.
- MICHEL P. (1973) — Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Thèse Lettres, Univ. Strasbourg, (1970) et *Mém. ORSTOM*, 63, 752 p.
- MICHEL P. et SALL M. (1984) — Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal. *Mém. ORSTOM*, 106, p. 89 - 109.
- MONNET C. (1972) — Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama (Côte d'Ivoire). Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire. Thèse Sci., Univ. Nice, 427 p.
- MOSSER C., GALL J.C. et TARDY Y. (1971) — Géochemie des illites du grès à Voltzia du Buntsandstein des Vosges du Nord, France. *Chemical Geol.*, 9, p. 157 - 177.

- NOUVELOT J.F. (1969) — Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, VI, 4, p. 43 - 85.
- NOUVELOT J.F. (1972) — Le régime des transports solides en suspension dans divers cours d'eau au Cameroun de 1969 à 1971. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, IX, 1, p. 44 - 74.
- OLIVRY J.C. (1982) — Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap-Vert. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, XX, 1, p. 47 - 70.
- OLIVRY J.C. (1983) — Contribution de la prévision en hydrologie à l'éventuelle maîtrise des ressources déficitaires du fleuve Sénégal pour la saison 1983 - 1984. *Rapp. ORSTOM, Dakar*, 9 p.
- POLIAKOV B.V. (1938) — Recherches hydrogéologiques sur la basse Volga. *Mat. Projet Rech. Irrig. Bassin Volga, Kamychine*, 10.
- ROCHETTE C. (1974) — Le bassin du fleuve Sénégal. *Monogr. Hydrol., ORSTOM*, 1, 391 p.
- SALL M. (1982) — Dynamique et morphogenèse actuelle du Sénégal Occidental. Thèse Lettres, Univ. Strasbourg, 604 p.
- SEGUY J. (1955) — Rapport sur les mesures de débits solides du fleuve Sénégal à Dagana (campagne 1955). *Bull. Mission Aménag. Fleuve Sénégal (M.A.S.)*, 42, 28 p.
- SOW A.A. (1984) — Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Thèse 3e cycle, Univ. Nancy II, 442 p.
- SPRONCK R. (1941) — Mesures hydrographiques dans la région divagante du bief maritime du fleuve Congo. *Mém. Inst. Roy. Col., Bruxelles*, 3, 1, 56 p.